

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program B2341 – Strojírenství

Strojírenská technologie
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Vliv teploty na tvařitelnost hlubokotažných plechů

The temperature influence on formability of deep-drawing sheets metal

Martin Plešivec
KSP – TP – B60

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. – *TU v Liberci*

Konzultant bakalářské práce: Ing. Michaela Kolnerová, Ph.D. – *TU v Liberci*

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	49
Počet tabulek	06
Počet příloh	01
Počet obrázků	25

Datum: 5.6.2009

Anotace

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

**Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů**

Studijní program: M2341 – Strojírenství

Student: Martin Plešivec

Téma práce: Vliv teploty na tvařitelnost hlubokotažných plechů

The temperature influence on formability of deep-drawing sheets metal

Číslo BP: KSP-TP – B60

Vedoucí BP: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. – *TU v Liberci*

Konzultant: Ing. Michaela Kolnerová, Ph.D. – *TU v Liberci*

Abstrakt:

Základním parametrem mající vliv na tvařitelnost ocelových materiálů je teplota, při které tváření probíhá.

V bakalářské práci je tato problematika řešena u dvou vybraných řad hlubokotažných materiálů používajících se při stavbě karoserie. Rozsah teplot je zvolen v rozsahu od 20°C do 280°C.

Abstract:

The main parameter influencing the formability of steel materials is the temperature of the forming process.

In my thesis this problematic is solved with two different types of the deep-drawing materials used in vehicle body construction. The temperature range is chosen from 20°C to 280°C.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 5. června 2009

.....

Martin Plešivec
Eliášova ul. 2244
470 01 Česká Lípa

Poděkování:

Zde, na tomto místě bych rád poděkoval všem odborným pracovníkům z Katedry strojírenské technologie Oddělení tváření kovů a plastů, kteří mi pomáhali se zpracováním bakalářské práce.

Především však musím poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. za cenné připomínky, trpělivost a pomoc jak se zpracováním bakalářské práce, tak s měřením hodnot v ní obsažené.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Martin P L E Š I V E C
Studijní program	B2341 Strojírenství
Studijní obor	3911R018 Materiály a technologie
Zaměření	Tváření kovů a plastů

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

Vliv teploty na tváritelnost hlubokotažných plechů

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Přehled materiálů používaných pro stavbu karoserie automobilu.
2. Základní mechanické zkoušky používané pro hodnocení tváritelnosti materiálů.
3. Experimentální zjištění vlivu teploty na mechanické hodnoty zvoleného hlubokotažného materiálu a materiálu vykazující BH efekt.
4. Vyhodnocení naměřených výsledků.
5. Závěr.

Forma zpracování bakalářské práce:

- průvodní zpráva cca 30 stran

- grafické práce

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

- [1] PEARCE,P.: Sheet Metal Forming, ISBN 0-7503-0101-5
- [2] Statická zkouška tahem, norma EN 10002-1
- [3] MACHEK, V. VESELÝ, L. VESELÝ, M. VIŠŇÁK, J.: Zpracování tenkých plechů, SNTL, Praha 1983
- [4] ASM Handbook 14. Forming and Forging, ASM International 2004, ISBN 0-87170-007-7
- [5] ELFMARK, J. a kol.: Tváření kovů, SNTL Praha 1992
- [6] MARCINIAK, Z. a kol.: Teorie tváření plechů, SNTL, Praha, 1964
- [7] KEJVAL, Z.: Tváření plechu I.- Základy lisování plechu, SNTL, Praha 1960

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Michaela Kolnerová, Ph.D.

L. S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
vedoucí katedry

prof. Ing. Petr Louda, CSc.
děkan

V Liberci dne 12. 3. 2009

OBSAH:

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	8
1. ÚVOD	10
2. TEORETICKÁ ČÁST	11
2.1. Plechy pro automobilový průmysl	11
2.1.1. Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněné hliníkem	11
2.1.2. Plechy z IF ocelí	11
2.1.3. Plechy z IF ocelí s BH efektem	12
2.1.3.1. BH oceli se zvýšeným obsahem uhlíku	13
2.1.3.1. BH oceli se zvýšeným obsahem Ti resp. Nb	13
2.2. Mechanizmy zpevnění plechů	14
2.2.1. Zpevnění tuhého roztoku	14
2.2.2. Zpevnění jemnozrnnou strukturou	15
2.2.3. Precipitační zpevnění	15
2.2.4. Zpevnění dvoufázovou a vícefázovou strukturou	15
2.3. Statické zkoušky krátkodobé	16
2.3.1. Statická zkouška tahem za normálních teplot	16
2.3.1.1. Průřezy zkušebních tyčí a jejich počáteční měřená délka	16
2.3.1.2. Pracovní diagram	17
2.3.1.3. Popis zkoušky	17
2.3.1.5. Vyhodnocení pracovního diagramu	18
2.3.1.6. Výpočet základních normalizovaných parametrů	19
2.3.2. Statická zkouška za tepla tahem	20
2.3.3. Statická zkouška za nízkých teplot tahem	21
2.4. Tvařitelnost pásů a plechů za studena	22
2.4.1. Normálová anizotropie	22
2.4.2. Plošná anizotropie	22
2.4.3. Deformační zpevnění	23
2.4.4. Další kritéria tvařitelnosti využívající zkoušku tahem	23
2.4.4.1. Kritérium zásoby plasticity	24
2.5. Vliv teploty na tvařitelnost ocelí	26
2.5.1. Stárnutí ocelí	27

2.5.1.1.	Stárnutí po rychlém ochlazení nízkouhlíkové ocelí	27
2.5.1.2.	Deformační stárnutí (stárnutí po tváření za studena)	28
2.5.1.3.	Důsledky stárnutí oceli	28
2.5.2.	Vliv teploty na přetvárný odpor materiálu	28
3.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	30
3.1.	Cíl experimentální části	30
3.2.	Specifikace materiálů	30
3.3.	Příprava vzorků	32
3.4.	Zkouška tahem	33
3.4.1.	Vyhodnocení naměřených výsledků plechu DX54D+Z100 MC	34
3.4.2.	Vyhodnocení naměřených výsledků plechu HX180BD+Z	36
3.5.	Ověření použitelnosti Kurnakovova teplotního zákona pro mechanické vlastnosti zkoušených plechů	38
3.5.1.	Vyhodnocení vypočtených výsledků pro plech DX54D+Z100 MC	39
3.5.2.	Vyhodnocení vypočtených výsledků pro plech HX180BD+Z	41
4.	DISKUZE VÝSLEDKŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	43
5.	ZÁVĚR	46
6.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	47
7.	SEZNAM PŘÍLOH	49

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<u>Označení</u>	<u>Jednotka</u>	<u>Název</u>
$A_{80\text{mm}}$	[%]	tažnost
C	[N/mm ²]	koeficient monotónního zpevnění
CQ	[-]	plechy běžné kvality
DDQ	[-]	hlubokotažné plechy
DQ	[-]	tažné plechy
EDDQ	[-]	zvlášť hlubokotažné plechy
EDDQ-S	[-]	super hlubokotažné plechy
F	[N]	síla
F_e	[N]	síla na mezi kluzu
F_m	[N]	maximální síla
$F_{p0,2}$	[N]	smluvní síla na mezi kluzu
IF	[-]	oceli bez intersticií
k_p	[MPa]	přetvárná pevnost
k_0	[MPa]	přetvárný odpor
L	[mm]	délka
L_u	[mm]	délka po přetržení tyče
L_0	[mm]	počáteční měřená délka
M	[MPa]	mechanická vlastnost
n	[-]	exponent deformačního zpevnění
r	[-]	součinitel normálové anizotropie
r_s	[-]	střední hodnota součinitele normálové anizotropie
r_0, r_{45}, r_{90}	[-]	koeficienty normálové anizotropie
R	[MPa]	smluvní napětí
R_e	[MPa]	mez kluzu
R_{eH}	[MPa]	horní mez kluzu
R_{eL}	[MPa]	dolní mez kluzu
R_m	[MPa]	mez pevnosti
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
S	[mm ²]	okamžitý průřez
S_u	[mm ²]	průřez tyče v místě přetržení
S_0	[mm ²]	počáteční průřez
t	[°C]	teplota

Z	[%]	kontrakce
ZP	[N.mm/mm ³]	zásoba plasticity
α	[-]	teplotní koeficient
α_{pr}	[-]	průměrný teplotní koeficient
ε	[-]	poměrné prodloužení
ε_g	[-]	maximální rovnoměrné poměrné prodloužení
ε_L	[-]	poměrná délka Lüdersovy deformace
ε_u	[-]	maximální poměrné trvalé prodloužení
σ	[MPa]	skutečné napětí
φ	[-]	skutečná deformace
ΔL	[mm]	prodloužení
ΔL_L	[mm]	Lüdersova deformace
ΔL_u	[mm]	přírůstek původní měřené délky po přetržení
Δr	[-]	součinitel plošné anizotropie
ΔS_u	[-]	rozdíl původního a konečného průřezu tyče

1. ÚVOD

Oblast tváření patří k nejvýznamnějším technologiím, která je nepostradatelnou součástí strojírenského průmyslu a lze se s ním setkat v řadě oborů. Především pak automobilový průmysl dnes patří k nejdynamičtěji se rozvíjejícím odvětvím. Konkurence je zde značná, výrobní závody denně opouští tisíce nových vozidel, a proto se zde uplatňují nové a moderní technologie, postupy a také v neposlední řadě materiály.

Pro popis chování materiálů při tváření je hlavní znalost jejich mechanických vlastností. Působící síly při vlastním tváření způsobují plastické přetvoření a trvalou deformaci materiálu.

V samotném automobilovém průmyslu je používána široká škála materiálů pro výrobu karosérií, která se neustále rozšiřuje. Obzvláště pak nové druhy plechů používané v automobilovém průmyslu mají odlišné a často např. tepelně aktivované samovytvrzovací vlastnosti. Tyto vlastnosti pak mohou v důsledku tváření se spojením s místním ohřevem a zahřátou formou způsobit, že se plech při tváření vytvrdí, ztratí své tvářecí vlastnosti a stane se nepoužitelný. Při tváření mohou vznikat v některých případech teploty blížící se 100°C i více. Zkoušky plechů se ovšem ve větší míře provádí jen při pokojové teplotě a pomalých rychlostech deformace a neobsahují tudíž komplexní informace o možnostech materiálů, zvláště pak o jejich maximálních hodnotách možného přetvoření. Proto roste poptávka po znalostech mechanických vlastností získaných za jiných než klasických podmínek.

Cílem této bakalářské práce je proto experimentálně určit u dvou zvolených řad hlubokotažných plechů závislost mechanických hodnot na teplotě tváření a možnost použití existujících matematických vztahů na výpočet těchto hodnot.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. PLECHY PRO AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL [1], [2], [3], [4], [5]

Ocelové materiály pro stavbu automobilových karosérií můžeme rozdělit na *vysokopevnostní* a *hlubokotažné* plechy. Hlubokotažné plechy zajišťují snadnou výrobu pro tvarově složité výlisky díky své vysoké tvařitelnosti a vzhledem k zaměření této bakalářské práce na hlubokotažné plechy, budou zde tyto plechy přednostně probírány.

2.1.1. Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněné hliníkem

Z ocelí této skupiny se vyrábějí plechy pro stavbu automobilových karosérií a pro další zpracování za studena. Díky svým mechanickým vlastnostem a zejména vysokou tvařitelností jsou určeny pro tvarově složité výlisky jako např.: pohledové díly karosérie, na které jsou kladeny i nároky na povrchové vlastnosti. Aby probíhala plastická deformace při tváření již při nízkém napětí, požaduje se co nejnižší mez kluzu, kterou zvyšuje zejména uhlík, proto se jeho obsah snižuje pod 0,10%.

Tyto oceli jsou pro zvýšení pevnosti legovány fosforem nebo jsou mikrolegovány např. manganem, křemíkem, hliníkem, vanadem a titanem.

V závislosti na mechanických vlastnostech, způsobu výroby a chemickém složení byly hlubokotažné plechy rozděleny podle kvality do několika skupin:

- | | |
|---|------------------------------|
| • CQ (ComercialQuality) | - plechy běžné kvality |
| • DQ (DrawingQuality) | - tažné plechy |
| • DDQ (DeepDrawingQuality) | - hlubokotažné plechy |
| • EDDQ (ExtraDeepDrawingQuality) | - zvlášť hlubokotažné plechy |
| • EDDQ-S (Extra Deep Drawing Quality-Super) | - super hlubokotažné plechy |

Protože především žárově pozinkované hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem podléhají stárnutí (vlivem teplotních procesu probíhajících v pozinkovací lince), stále s větší mírou se přecházelo na IF oceli, které tento problém eliminují.

2.1.2. Plechy z IF ocelí

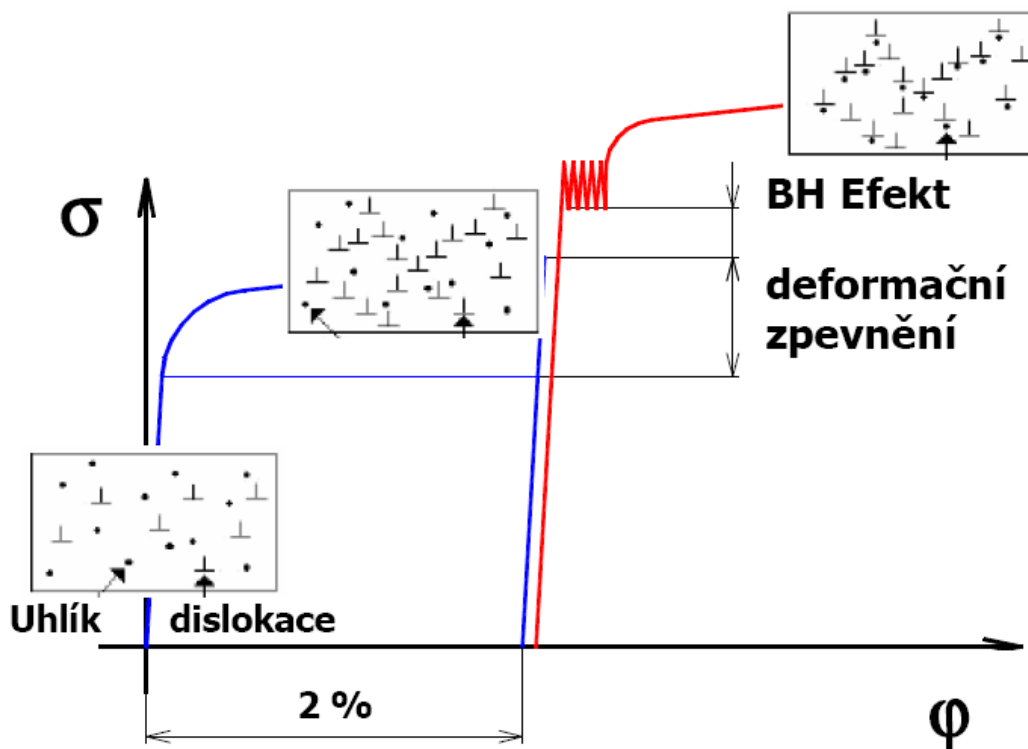
Konkurence ocelí a hliníku jako konstrukčních materiálů na karoserie automobilů vedla k vývoji nových typů ocelí pro tváření za studena. Byly vyvinuty oceli s velmi malým

obsahem intersticiálních prvků (C,N) při zachování technologických vlastností ocelového plechu s vyšší pevností a mezí kluzu. Tyto oceli bývají označovány jako IF oceli („interstitials free steels“).

IF oceli jsou dnes běžně používány pro stavbu automobilové karosérie. Nemají interstiticky rozpustné atomy uhlíku a dusíku, ale tyto atomy jsou vázané ve formě stabilních karbonitridů (TiCN, NbCN) pomocí mikrolegování Nb či Ti anebo kombinací Nb a Ti. Po snížení obsahu uhlíku a dusíku ve formě tuhého roztoku se dosáhlo výrazného zlepšení plastických vlastností oceli. Výsledné mechanické vlastnosti jsou závislé na obsahu dalších legujících prvků způsobujících zpevnění (např.: Mn, P), množství a rozptýlení precipitátů, velikosti feritického zrna a také na úběru při hladícím válcováním. Tento úběr má za následek zpevnění a vznik deformační struktury, které snižují tvařitelnost. Tyto oceli lze zpevnit způsoby popsány v kapitole 2.2.

2.1.3. Plechy z IF ocelí s BH efektem

Nevýhodou IF ocelí je jejich nízká mez kluzu, proto byly vyvinuty IF ocele vykazující BH efekt (Bake Hardening) (Obr. 2.1.3.1).



Obr. 2.1.3.1: Princip BH efektu [2]

BH efekt znamená, že materiál je tepelně vytvrzen. Tímto procesem lze zvýšit mez kluzu o 30 až 80 MPa. Velikost efektu je závislá z hlediska chemického složení na obsahu

Mn a S a z hlediska předchozí deformace záleží na historii zatěžování (válcování za studena) a na parametrech rekrystalizačního žíhání.

Tyto oceli v sobě spojují výbornou tvařitelnost při zpracování díky nízké mezi kluzu s následným nárůstem této hodnoty po tepelném vytvrzení. Z hlediska BH efektu můžeme IF oceli pro výrobu plechů rozdělit do dvou druhů:

2.1.3.1. BH oceli se zvýšeným obsahem uhlíku

Množství legujících prvků titanu a niobu je pouze na takové úrovni, aby část intersticiálně rozpuštěného uhlíku ve feritové mřížce zůstala i po válcování za tepla nevázána na vzniklé karbidy legur. K BH efektu potom dochází při nižších teplotách vypalování laku karosérie tj. 170°C při trvání 20 minut. Jelikož v tuhém roztoku existuje určité množství nevázaného uhlíku, nelze dosáhnout extrémně vysoké hlubokotažnosti plechu. Tyto oceli se přednostně používají především pro plechy na velkoplošné výlisky dílů karoserii (střecha, kapota, dveře).

2.1.3.2. BH oceli se zvýšeným obsahem Ti resp. Nb

Při tváření se intersticiální uhlík v tuhém roztoku prakticky nevyskytuje. Tím je zaručena vynikající hlubokotažnost těchto plechů. Uhlík potřebný pro vytvrzovací efekt se získá rozpuštěním karbonitridických precipitátů při vysokoteplotním žíhání na kontinuální žíhací lince a následným rychlým ochlazením. Vytvrzení je tím větší, čím vyšší je žíhací teplota a rychlost ochlazování. Výroba i použití těchto ocelí je energeticky nákladnější než u ocelí s vyšším obsahem uhlíku.

2.2 MECHANIZMY ZPEVNĚNÍ PLECHŮ [6], [7], [8]

Jak už bylo zmíněno v kapitole 2. pro zvýšení pevnosti ocelí lze použít několik druhů mechanismů zpevnění, které se vzájemně prolínají. Několik těchto mechanismů je znázorněno na Obr. 2.2.1.

Mechanismus zpevnění	Schéma
Zpevnění tuhého roztoku	<p>základní atom</p> <p>intersticiální atom</p> <p>substituční atom</p>
BH efekt	<p>intersticiální atom</p> <p>dislokace</p>
Strukturní zpevnění	<p>hrubozrnná struktura</p> <p>jemnozrnná struktura</p>
Precipitační zpevnění	<p>hrubé</p> <p>jemné</p>

Obr. 2.2.1: Druhy zpevnění

2.2.1. Zpevnění tuhého roztoku

Atomy rozpuštěných prvků, umístěné v substitučních nebo intersticiálních polohách, deformují krystalovou mřížku a zvyšují v ní napětí. Svými chemickými a elektrickými vlastnostmi ovlivňují hodnotu meziatomárních vazebných sil. Mají tendenci, zvláště malé

atomy intersticiálně rozpuštěných prvků, koncentrovat se v okolí dislokací a zvyšovat tak napětí pro jejich pohyb. V souhrnu tak jejich vlivem dochází k následnému zpevnění.

2.2.2. Zpevnění jemnozrnnou strukturou

Neproniknutelnou překážku pohybujícím se dislokací tvoří hranice zrna. Zjemněním zrna docílíme, že je těchto překážek více a tím zamezíme pohybu dislokací, které se kupí na těchto překážkách. Hromaděním dislokací na hranicích se proto projeví intenzivním zpevňováním.

2.2.3. Precipitační zpevnění

Při vhodné rychlosti ochlazování lze potlačit fázové přeměny během ochlazování a tak zachovat tuhý roztok o původní koncentraci. Za normální teploty se tento roztok stává přesycený, a tedy v nerovnovážném stavu. Rozpad tohoto nerovnovážného a značně přesyceného tuhého roztoku má za důsledek, že nová fáze se už nemůže vylučovat jen na hranicích zrn, ale z důvodu malé difúzní rychlosti i v celém prostoru zrna. To má za následek výrazné vnitřní pnutí a zvýšení jak pevnosti, tak i meze kluzu.

2.2.4. Zpevnění dvoufázovou a vícefázovou strukturou

Nárůstu pevnosti je dosaženo u extrémně jemné struktury obvykle pomocí kontinuálního žhání po válcování při mezikritické teplotě. Zatímco dochází k rekrystalizaci zrn, karbidy přítomné na jejich hranicích se rozpouštějí a předávají uhlík kovové matici. Současně se objevuje austenitická fáze (martenzit či bainit), která je rovnoměrně rozprostřena ve formě ostrůvků v feritické matici.

2.3. STATICKÉ ZKOUŠKY KRÁTKODOBÉ [9], [10]

Statickými zkouškami se hodnotí chování materiálu za působení stálých nebo pomalu a spojitě se měnících sil. Podle druhu namáhání se jedná o zkoušku tahem, tlakem, smykem a ohybem a zkoušky tvrdostí. Z nich nejpoužívanější jsou statická zkouška tahem a zkoušky tvrdosti.

2.3.1 Statická zkouška tahem za normálních teplot

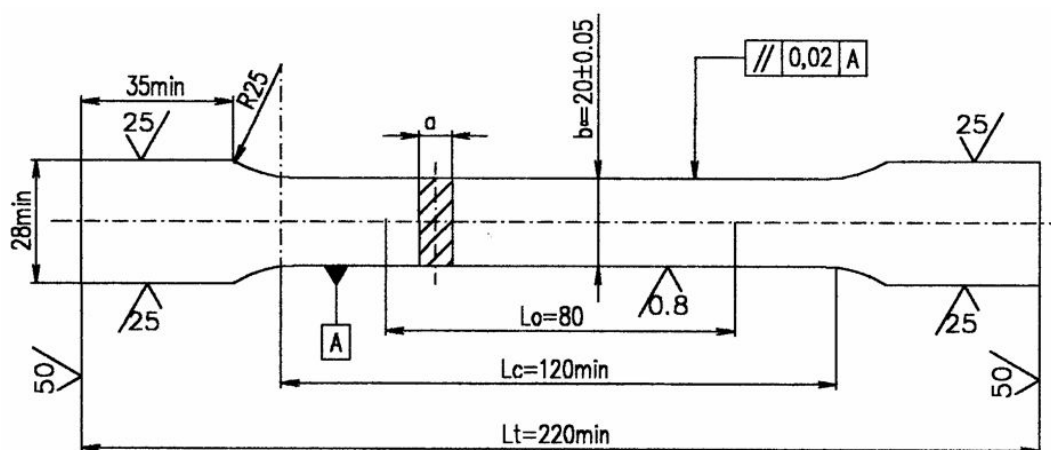
Statická zkouška tahem (ČSN EN 10002-1) spočívá v deformaci zkušební tyče postupně se zvyšujícím tahovým zatížením předepsanou (poměrně malou) rychlostí, obvykle až do lomu. Účelem je stanovení napětí při daných deformacích.

Zkouška se provádí za okolní teploty mezi 10 až 35°C, ale podle požadavku i za teplot vyšších nebo i nižších.

2.3.1.1. Průřezy zkušebních tyčí a jejich počáteční měřená délka

Zkušební tyče jsou normalizovány a mají kruhový, obdélníkový, čtvercový nebo víceúhelníkový průřez. Konce tyčí, které slouží k upnutí, mají větší průřez, než je vnitřní část tyče, která je určena k měření.

Na zkušební tyči (Obr. 2.3.1.1a) se vyznačí vzdálenost L_0 (počáteční měřená délka), na níž se zjišťují všechny potřebné hodnoty nutné pro výpočet mechanických parametrů zkoušeného materiálu.



Obr. 2.3.1.1a: Zkušební tyč s obdélníkovým průřezem

2.3.1.2 Pracovní diagram

Postupně se zvyšující tahová síla F vyvozená zkušebním strojem zkušební tyč prodlužuje, při čemž se prodlužuje i měřená část tyče z původní délky L_0 na okamžitou délku $L = L_0 + \Delta L$. Závislost tohoto prodloužení na velikosti vyvozené síly se graficky znázorňuje tzv. pracovním diagramem. Současně se podle zákonitosti o neměnnosti objemu zmenšuje původní průřez S_0 na okamžitý S .

Tvary diagramů kovových materiálů se dělí na dva základní typy:

1) Pracovní diagram s výraznou mezí kluzu, jehož představitelem je diagram neuklidněné nízkouhlíkové vyžíhané oceli (Obr. 2.3.1.4a).

2) Pracovní diagram s nevýraznou mezí kluzu, který tvoří plynule stoupající křivku. Jeho představitelem je diagram vyžíhané uklidněné oceli (Obr. 2.3.1.3a).

2.3.1.3. Popis zkoušky

Nejprve se zkušební tyč se prodlužuje přímo úměrně ke vzrůstající zatěžující síle. Grafickým záznamem této fáze je proto přímka.

Při překročení síly na mezí úměrnosti se zkušební tyč začíná již trvale (plasticky) deformovat.

U diagramu s výraznou mezí kluzu je konec 2. fáze charakterizován různě dlouhým zastavením, někdy i poklesem zatěžující síly. Deformace, která vzniká při těchto podmínkách se nazývá Lüdersova deformace ΔL_L .

Dosažená síla, při níž vzniká prodleva, se nazývá síla na mezí kluzu a označuje se F_e .

U diagramu s nevýraznou mezí kluzu je 2. fáze ukončena dosažením smluvní trvalé deformace, která je dána hodnotou 0,2% původní měřené délky L_0 . Dosažená síla se nazývá smluvní síla na mezí kluzu a označuje se $F_{p0,2}$.

Dále se zkušební tyč při vzrůstajícím zatížením nad mez kluzu trvale deformuje a to rovnoměrně po celé své měřené délce až do okamžiku, kdy se zkušební tyč začne na některém svém místě zaškrcovat. Největší zatížení, které se dosáhne v průběhu zkoušky se označuje F_m .

Po oblasti rovnoměrné deformace přechází zkušební tyč do fáze, kdy zatěžující síla i při postupující deformaci klesá a současně se na zkušební tyči vytváří místní zúžení průřezu (zaškrčení), kdy vzniká tzv. krček. Tato fáze a celý pracovní diagram končí přetržením zkoušené tyče.

2.3.1.4. Vyhodnocení pracovního diagramu

Pracovní diagramy síla-prodloužení (F – ΔL) neumožňují porovnání jednotlivých materiálů, a proto se síly i prodloužení přepočítávají na napětí a relativní prodloužení.

Při zatěžování vzniká ve zkušební tyči tahové napětí $\sigma = F/S$ [MPa], které se označuje jako skutečné napětí. V diagramu σ – ε se tento vztah znázorní stále se zvyšující křivkou, která dosáhne v okamžiku lomu maxima.

Protože zjišťování okamžitých průřezů tyče S , které se během zatěžování snižují, by činilo velké potíže, zvláště u nekuhových tyčí, u nichž se nezmenšuje jen tloušťka a šířka, ale mění se i tvar průřezu tyče, používají se výhradně tzv. smluvní napětí označované písmenem R (2.3.1.4a):

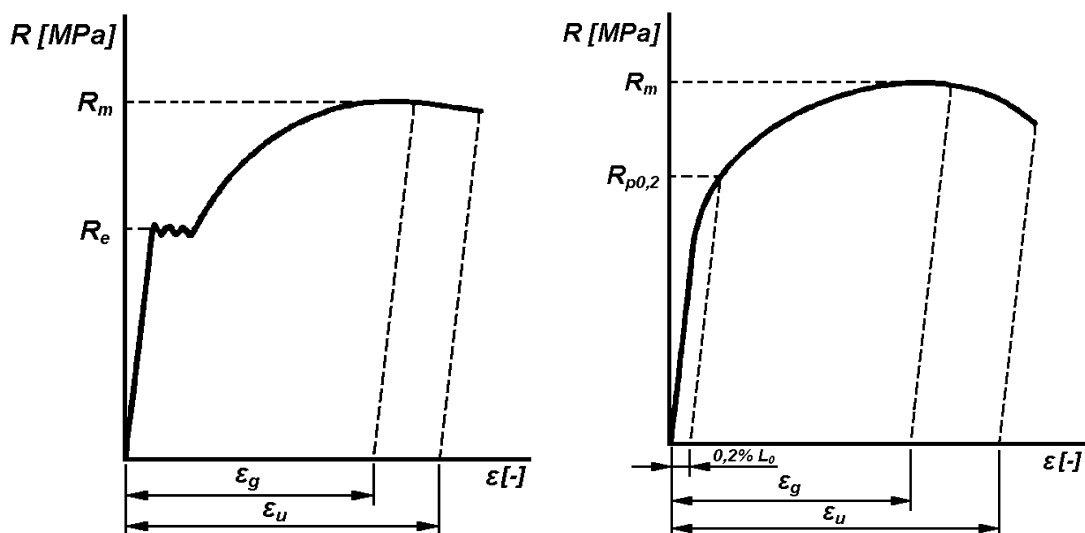
$$R = \frac{F}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.3.1.4a)$$

kde je:

F ... zatěžující síla [N]

S_0 ... plocha původního průřezu tyče [mm²]

Pro vyjádření deformace se používá poměrné prodloužení $\varepsilon = \Delta L/L_0$ (bezrozměrná veličina).



Obr. 2.3.1.4a: Pracovní diagram a) s výraznou mezí kluzu, b) s nevýraznou mezí kluzu

2.3.1.5. Výpočet základních normalizovaných parametrů

Mez kluzu

Mez kluzu R_e je smluvní napětí, které se vypočte jako poměr příslušné síly F [N] na mezi kluzu k ploše původního průřezu S_0 [mm²].

Výrazná mez kluzu R_e (2.3.1.5a).

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.3.1.5a)$$

U ní se ještě někdy rozlišuje horní mez kluzu R_{eH} (2.3.1.5b) a dolní mez kluzu R_{eL} (2.3.1.5c):

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.3.1.5b)$$

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.3.1.5c)$$

Nevýrazná mez kluzu

Nevýrazná mez kluzu $R_{p0,2}$ (2.3.1.5d) se určuje ze síly odpovídající trvalé absolutní deformaci $\Delta L = 0,2\% L_0$:

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.3.1.5d)$$

Mez pevnosti

Mez pevnosti R_m (2.3.1.5e) je smluvní napětí, které se vypočte jako poměr maximální síly F_m [N] k ploše původního průřezu zkušební tyče S_0 [mm²].

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.3.1.5e)$$

Tažnost

Tažnost (2.3.1.5f), obecně označovaná písmenem A je maximální poměrné trvalé prodloužení ε_u vyjádřené v %.

$$A = 100 \cdot \varepsilon_u = 100 \cdot \frac{\Delta L_u}{L_0} \quad [\%] \quad (2.3.1.5f)$$

kde je:

L_0 ... původní měřená délka tyče [mm]

L_u ... délka po přetržení původního měřeného úseku [mm]

$\Delta L_u = (L_u - L_0)$... přírůstek původní měřené délky po přetržení [mm]

Kontrakce (zúžení)

Kontrakce Z (2.3.1.5g) vyjadřuje procentuální poměr průřezu přetržené zkušební tyče k jejímu původnímu průřezu.

$$Z = 100 \cdot \frac{\Delta S_u}{S_0} \quad [\%] \quad (2.3.1.5g)$$

kde je:

S_u ... průřez tyče v místě přetržení [mm²]

S_0 ... původní průřez tyče [mm²]

$\Delta S_u = S_0 - S_u$... rozdíl původního a konečného průřezu tyče [mm²]

U tyčí jiných než kruhových průřezů se kontrakce určuje výjimečně z důvodů obtížnosti zjišťování zúženého průřezu.

2.3.2. Statická zkouška za tepla tahem

Zkouška za tepla tahem (ČSN EN 10002-5) se v podstatě neliší od stejných zkoušky při teplotě okolí. Zkušební tělesa se přídavným zařízením (např. odporovou, elektrickou pískou nebo solnou lázní) ohřívají na zkušební teplotu. K získání srovnatelných výsledků se musí dodržet předepsané zkušební podmínky (zejména rychlost, zatěžování, rovnoměrné prohřátí tělesa atd.).

Určuje se při ní obvykle pracovní diagram, jako u zkoušky při teplotě okolí a základní mechanické charakteristiky (pevnost, mez kluzu, tažnost a kontrakce) při dané teplotě.

Krátkodobá zkouška tahem v oblasti tvářecích teplot dává některé cenné informace o

tvárnosti a přetvárném odporu materiálu.

2.3.3. Statická zkouška za nízkých teplot tahem

Pevnostní charakteristiky (R_m , R_e) se při snižování teploty zvyšují, hodnoty charakterizující plasticitu oceli (tažnost, kontrakce) klesají.

Proto pro součásti strojů a zařízení, jež mají pracovat za nízkých teplot, je nutné zjišťovat vlastnosti konstrukčních materiálů za předpokládané provozní teploty.

Způsob jejich provedení se neliší v zásadě od zkoušek při teplotě okolí. Používají se také stejné zkušební stroje, doplněné pouze vhodným chladicím zařízením. To musí umožnit rovnoměrné ochlazení zkušebního tělesa na předepsanou teplotu a její udržení během zkoušky.

2.4. TVÁŘITELNOST PÁSŮ A PLECHŮ ZASTUDENA [9]

Plechý a pásy tvoří velmi důležitou součást sortimentu automobilového průmyslu, a proto je nutností mít hlubší znalosti o jejich tvařitelnosti zastudena.

Tvařitelnost plechů a pásů zastudena je schopnost vytvořit plastickou deformaci zastudena v požadované kvalitě daný výrobek. Zkoušky tvařitelnosti zastudena simulují procesy tváření používané při lisování do trojrozměrného (prostorového) tvaru technologiemi vypínání nebo hlubokého tažení. Vycházejí buď z klasické tahové zkoušky nebo z různých technologických zkoušek.

2.4.1. Normálová anizotropie

Normálová anizotropie (Obr. 2.4.2.1) vyjadřuje odlišnost mechanických vlastností a tím i velikostí deformací zjištěných v rovině pásu nebo plechu a v rovině k ní kolmé. Její velikost je daná součinitelem normálové anizotropie r (2.4.1.1). Je definován podílem skutečného (logaritmického) zmenšení šířky φ_b [-] ke skutečnému (logaritmickému) zmenšení tloušťky φ_a [-] měřené délky zkušební tyče v oblasti rovnoměrné deformace.

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_a} \quad [-] \quad (2.4.1.1)$$

Čím vyšší je hodnota r , tím více plech odolává místnímu ztenčení tloušťky.

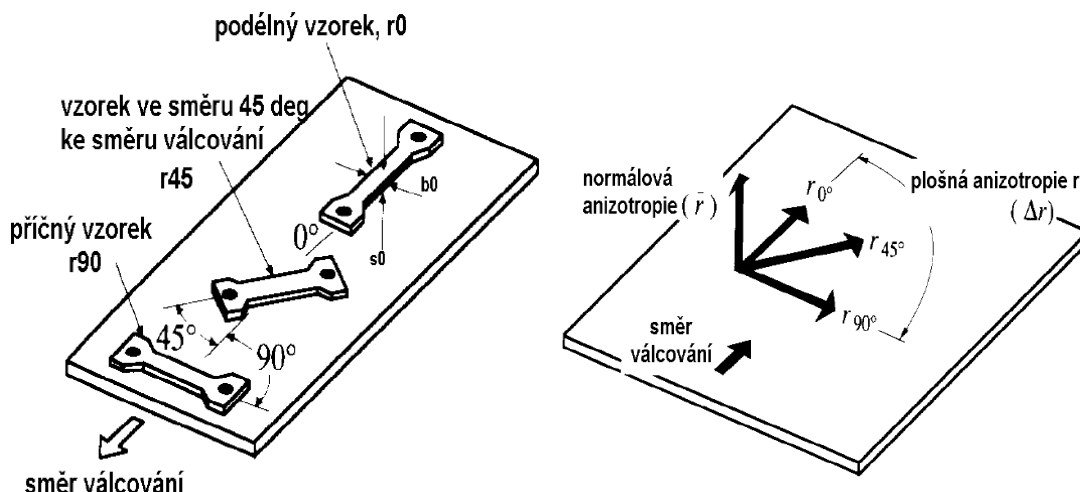
Střední hodnota součinitele normálové anizotropie (2.4.1.2) je dána aritmetickým průměrem koeficientů normálové anizotropie ze směrů 0° , 45° , 90° k ose válcování.

$$r_s = 0,25.(r_0 + r_{90} + 2r_{45}) \quad [-] \quad (2.4.1.2)$$

2.4.2. Plošná anizotropie

Plošná anizotropie (Obr. 2.4.2.1) vyjadřuje rozdílnost mechanických vlastností v rovině pásu nebo plechu zjištěných v různých směrech vzhledem ke směru válcování. Tyče se odebírají obvykle ze směrů 0° , 90° a 45° . Plošná anizotropie (2.4.2.1) se hodnotí součinitelem plošné anizotropie Δr , který se vypočítává z hodnot koeficientů normálové anizotropie r_0 , r_{45} a r_{90} :

$$\Delta r = 0,5.(r_0 + r_{90} - 2.r_{45}) \quad [-] \quad (2.4.2.1)$$



Obr. 2.4.2.1: Znázornění normálové a plošné anizotropie

2.4.3. Deformační zpevnění

Míru schopnosti daného materiálu se zpevňovat při své plastické deformaci zastudena vyjadřuje exponent deformačního zpevnění n (2.4.3.1). Je definován jako exponent parabolické rovnice vyjadřující závislost mezi skutečným napětím σ a logaritmickou deformací φ [-]:

$$\sigma = C \cdot \varphi^n \quad [\text{MPa}] \quad (2.4.3.1)$$

kde je:

C ... koeficient monotónního zpevnění [N/mm^2]

Čím je hodnota exponentu deformačního zpevnění větší, tím materiál lépe odolává nerovnoměrné deformaci při tahovém namáhání.

2.4.4. Další kritéria tvařitelnosti využívající zkoušku tahem

Samotné hodnoty získané tahovou zkouškou nevyjadřují dostatečně vhodnost pro tváření zastudena. Hledala se proto další kritéria, která by využila výhod tahové zkoušky a přitom by komplexněji charakterizovala daný materiál.

Kombinací výsledků získaných tahovou zkouškou se došlo k několika novým kritériím, z nichž nejvíce jsou používána tato:

1) Kritérium poměru meze kluzu k mezi pevnosti R_e/R_m nebo $R_{p0,2}/R_m$. Při jeho klesající hodnotě se usuzuje na rostoucí tvařitelnost kovu. Je to nejrychleji zjistitelný

ukazatel tvařitelnosti, protože meze kluzu a pevnosti se zjišťují prakticky vždy. Je to ale také nejméně spolehlivý ukazatel tvařitelnosti a v praxi se již nepoužívá.

2) Kritérium poměru tažnosti A_{80mm} k mezi kluzu $R_{p0,2}$ (2.4.4.1) je praktické a exaktně vyzkoušené.

$$k = \frac{A_{80mm}}{R_{p0,2}} \cdot 100 \quad [\%MPa] \quad (2.4.4.1)$$

S jeho stoupající hodnotou roste tvařitelnost oceli zastudena.

3) Kritérium velikosti hodnoty normálové anizotropie r , kdy její vyšší hodnoty charakterizují vyšší tvařitelnost zastudena při tvářecích operacích označených jako hluboký tah (kombinace dvojosého napětí tah-tlak).

4) Kritérium velikosti exponentu zpevnění n , kdy jeho vyšší hodnoty charakterizují vyšší tvařitelnost zastudena při tvářecích operacích označovaných jako vypínání (kombinace dvojosého napětí tah-tah).

5) Kritérium velikosti součinu r_s a n_s se používá pro tvářecí operace, kde se vyskytují smíšená tahová a tlaková napětí. Čím je tento součin větší, tím je materiál k tomuto tváření vhodnější.

6) Kritérium dané součinem R_m a A_{80mm} . Vyšší hodnota tohoto ukazatele ukazuje na vyšší tvařitelnost kovu.

7) Kritérium zásoby plasticity

8) Kritérium velikosti koeficientu využití plasticity

2.4.4.1. Kritérium zásoby plasticity

Zásoba plasticity ZP vyjadřuje množství práce v Nmm potřebné k plastické deformaci 1 mm^3 materiálu při překročení meze kluzu v oblasti rovnoměrné (homogenní) deformace při jednoosém tahu.

Takto získaná hodnota se pro kovový materiál s nevýraznou mezí kluzu (Obr. 2.4.4.1a) se vypočte:

$$ZP = 0,75 \cdot (R_m - R_{p0,2}) \cdot \varepsilon_g \quad [\text{N} \cdot \text{mm} / \text{mm}^3] \quad (2.4.4.1a)$$

a pro výraznou mezí kluzu se tento vztah rozšíří o vliv Lüdersovy deformace (Obr. 2.4.4.1a):

$$ZP = 0,75 \cdot (R_m - R_{eL}) \cdot (\varepsilon_g - \varepsilon_L) \quad [\text{N} \cdot \text{mm} / \text{mm}^3] \quad (2.4.4.2b)$$

kde je:

R_m ... mez pevnosti [MPa]

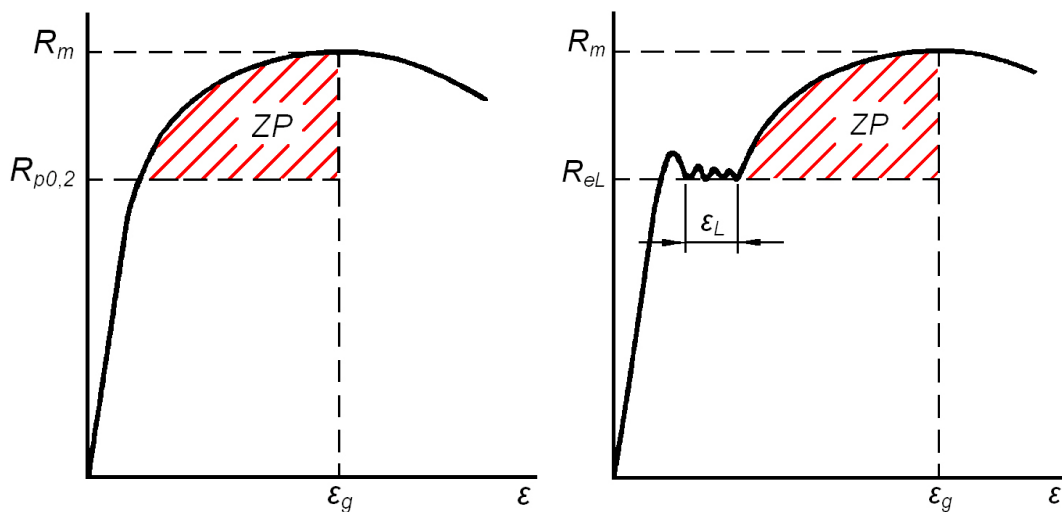
$R_{p0,2}$... smluvní mez kluzu [MPa]

ε_g ... maximální rovnoměrné (homogenní) poměrné prodloužení [-]

R_{eL} ... dolní mez kluzu [MPa]

ε_L ... poměrná délka (prodloužení) Lüdersovy deformace [-]

Výhodou kritéria zásoby plasticity pro hodnocení tvažitelnosti materiálu zastudena je, že ho lze použít pro libovolný tvar průřezu. Kromě toho je možno výrazněji oddělit od sebe v určitých případech materiály s různě velkou plasticitou.

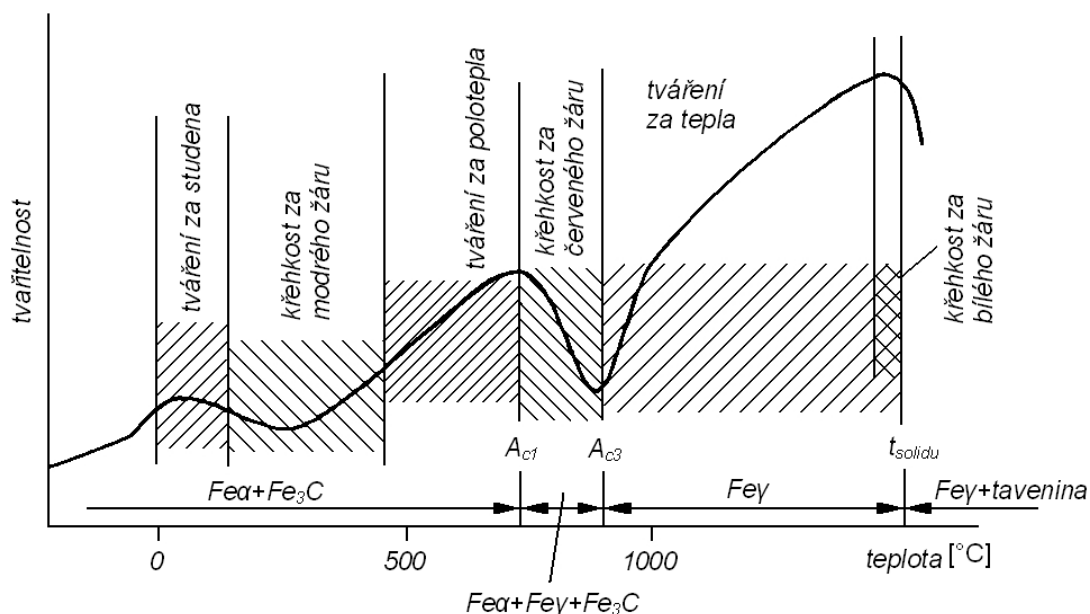


Obr. 2.4.4.1a: Znázornění ZP v pracovním diagramu a) s nevýraznou mezí kluzu, b) s výraznou mezí kluzu [9]

2.5. VLIV TEPLoty NA Tvařitelnost Ocelí [11-17]

Teplota vyjadřuje tepelný stav materiálu a představuje míru velikosti střední kinetické energie neuspořádaně kmitajících atomů.

Vliv teploty na tvařitelnost nelegované oceli charakterizuje obrázek závislosti tvařitelnosti nelegované nízkouhlíkové oceli na teplotě Obr. 2.5.1. Vzhledem k zaměření bakalářské práce především na teploty 20°C až 280°C bude popis omezen na rozmezí těchto teplot.



Obr. 2.5.1: Závislost tvařitelnosti nelegované nízkouhlíkové oceli na teplotě [12]

Z grafu vyplývá, že při teplotách pod 0°C dochází k poklesu plastických vlastností a tento jev se nazývá křehkost za nízkých teplot. Při pokojové teplotě je tvařitelnost vyšší, a proto tato oblast se využívá při tváření za studena. Při dalším ohřevu na vyšší teploty roste amplituda tepelných kmitů atomů tak, že se ulehčuje návrat atomů do rovnovážných poloh. V souvislosti s tím se deformace zrn od předešlého tváření (např.: válcování) značně vyrovnávají, což způsobuje snížení vlastních napětí. V oblasti mezi 200 až 400°C ale dochází ke snížení tvařitelnosti. Toto snížení se označuje jako lámavost za modrého žáru, podle typické barvy, která se objevuje na povrchu oceli. Lze vysvětlit vylučováním nejmenších částic karbidů na skluzových rovinách, což je analogické procesu stárnutí probírané v následující kapitole. Pak až do teploty A_{c1} tvařitelnost vzrůstá.

2.5.1. Stárnutí ocelí

Nežádoucí precipitace, stručně popsaná v kapitole 2.2., jakékoliv slitiny se nazývá stárnutí. To se většinou děje při teplotě okolí, která však může být mnohdy i vyšší než obvyklých 20°C, jako je tomu např. v letních měsících nebo v uzavřených vytápěných prostorech.

Stárnutí je výrazná charakteristická vlastnost všech neuklidněných nízkouhlíkových ocelí s obsahem C pod 0,15 hm.%. Se stoupajícím obsahem C jsou účinky stárnutí při teplotě okolí méně výrazné, až při obsahu C nad 0,30 hm.% je účinek stárnutí zanedbatelný. Existují dva druhy stárnutí:

2.5.1.1 Stárnutí po rychlém ochlazení nízkouhlíkové ocelí

Při stárnutí nízkouhlíkových ocelí se jedná vždy o rozpad přesyceného feritu. Při pomalu klesající teplotě se nasycenost feritu uhlíkem snižuje a v oblasti pod teplotou A_1 se vylučuje terciální cementit. Podobná závislost platí i pro N, který se vylučuje jako nitrid.

V praxi je rychlost ochlazování oceli obvykle vyšší, příslušné fáze se pak z feritu nestačí vyloučit a ferit se tak stává za normální teploty přesyceným tuhým roztokem. Jeho rozpad je provázen změnou mechanických vlastností.

Následkem snížené rozpustnosti N a C ve feritu v důsledku klesající teploty se intersticiální atomy uvolňují z přesyceného feritu a difundují do energeticky výhodnějších míst, což jsou hranice zrn a defektní části krystalové struktury, zejména dislokace. K tomu potřebují poměrně malou aktivační energii, a proto tento proces může proběhnout i při nízkých teplotách.

Slučování C na Fe_3C při pomalém ochlazování je natolik účinné, že zbylé množství C není při 20°C dostačující k vyvolání stárnutí. Rychlejším ochlazením z teplot maximální rozpustnosti C a N ve feritu však vznikne značně přesycený tuhý roztok, kdy se C nestačí sloučit na Fe_3C , a tak se kromě N může i C podílet na stárnutí i při teplotě okolí. Vliv C na stárnutí je však při pokojové teplotě vůči N vždy malý. Při teplotě 100°C, kdy rozpustnost C ve feritu je již podstatně vyšší, a také rychlost difúze atomů C se zvyšuje, je podíl C na stárnutí již značný.

Atomy C a N, které obklopují dislokace a vytvářejí bariéry, se nazývají Cottrellovy zóny. O dislokacích se pak říká, že mají Cottrellovu atmosféru. K pohybu takto obklopených dislokací je pak potřeba vyššího napětí, než k pohybu dislokací bez těchto atmosfér. Protože k trvalé deformaci dochází pohybem dislokací, je nutno překonat tyto bariéry zvýšeným napětím, které musí být větší než horní mez kluzu. Pak se mohou pohybovat dále již při působení nižšího napětí, které začíná na dolní mezi kluzu.

2.5.1.2 Deformační stárnutí (stárnutí po tváření za studena)

Je charakterizováno značnou hustotou pohyblivých dislokací. Silně přesycený ferit se po tváření za studena rozpadá podstatně rychleji, změny vlastností jsou výraznější a mají stabilnější ráz než v případě stárnutí po rychlém ochlazení. Toto stárnutí se může uskutečňovat také v průběhu tváření při teplotách odpovídajících aplikované rychlosti deformace. Při malých rychlostech deformace (tahová zkouška) je to teplotní oblast 150 až 200°C. Tento jev se označuje jako dynamické deformační stárnutí (křehkost za modrého žáru).

2.5.1.3. Důsledky stárnutí oceli

Stárnutím se zvyšuje tvrdost a pevnostní hodnoty, klesá tažnost, kontrakce a vrubová houževnatost. Stárnutí tedy může vést k výraznému zkřehnutí oceli, zejména u zařízení pracujících za zvýšených teplot, která byla vyrobena z ocelí tvářených za studena s vyšším obsahem dusíku.

2.5.2. Vliv teploty na přetvárný odpor materiálu

Přetvárný odpor k_0 (přirozený deformační odpor, přetvárná pevnost) – je vnitřní odpor (napětí) materiálu proti působení vnějších sil za podmínek jednotného stavu napjatosti, při kterém nastane počátek plastické deformace – přetvoření za daných termomechanických podmínek (chem. složení, struktura materiálu, teplota, rychlost a stupeň přetvoření, atd.). Při jednoosém stavu napjatosti (tahová zkouška) se přetvárný odpor k_0 nazývá přetvárná pevnost k_p a odpovídá mezi kluzu R_e .

Teplota, při které probíhá tváření kovů významně ovlivňuje odpor proti přetvoření. Se zvýšenou teplotou se zvětšuje pohyblivost atomů, takže je lze snáze vychýlit z rovnovážné polohy.

Gubkin dokázal, že pro přetvárný odpor lze použít obecný Kurnakovův teplotní zákon pro mechanické vlastnosti, který lze vyjádřit vztahem:

$$M = M_0 \cdot e^{-\alpha(t-t_0)} \quad (2.5.2.1)$$

kde je:

M , resp. M_0 ... mechanická vlastnost při teplotě t , resp. t_0

α ... teplotní koeficient

Teplotní koeficient α zahrnuje všechny podstatné vlivy, na nichž mechanické vlastnosti závisí. Je to složení a fyzikální vlastnosti materiálu, ale také podmínky tváření (napjatost stupeň a rychlost přetvoření apod.

Analogicky lze tento vzorec upravit pro přetvárný odpor do podoby:

$$k_0 = k_{0t} \cdot e^{-\alpha(t-t_0)} \quad (2.5.2.2)$$

kde je:

k_0 , resp. k_{0t} ... přetvárný odpor při teplotě t , resp. t_0

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1. Cíl experimentální části

Cílem experimentální části je zjistit spojitost mezi tvařitelností a teplotou u plechů používaných v automobilovém průmyslu. Toto teplo vzniká při tvářecích operacích jako např.: tažení apod. a vznik tohoto tepla již byl prokázán v jiných odborných pracích a publikacích viz. [18]. Pro zjištění spojitosti tvařitelnost-teplota se prováděl experiment pomocí statické tahové zkoušky. Byly vybrány dvě řady hlubokotažných plechů s odlišnými mechanickými vlastnostmi a reakcí na zvýšenou teplotu. První řada je nelegovaný jakostní plech DX54D (EN 10 142) a druhá je plech s BH efektem HX180B (EN 10 143).

Pro experiment byl volen rozsah teplot od teploty okolí tj. 20°C do 280°C, což je nejvyšší pracovní teplota zkušební komory. Pro jednotlivé sady měření byl zvolen teplotní skok 30°C až do teploty 280°C v počtu 5 kusů zkušebních tyčí na 1 nastavenou teplotu.

Další cíl experimentu bylo zjištění, zda je možné použít Kurnakovova teplotního zákona uvedený v teoretické části na výpočet mechanických vlastností u obou rozdílných plechů při zvýšených teplotách.

3.2. Specifikace materiálů [19]

Pro experiment byly zvoleny tyto dva materiály:

1) NELEGOVANÝ JAKOSTNÍ HLUBOKOTAŽNÝ PLECH DX54D+Z100 MC tloušťky 0,72mm

kde je:

D... ploché ocelové výrobky k tváření za studena

X... způsob válcování (za tepla či za studena) - není předepsán

54... rozlišení jakosti oceli

D... povrch upravený ponorem v tavenině

Z100... žárově pokovený zinkem o hmotnosti povlaku min. 100 g/m² (pro 3 vzorky)

MC... typ povrchu

Dle normy ČSN EN 10 142 má tento materiál předepsány tyto hodnoty:

a) chemické: uhlík C=0,12% max.

křemík Si=0,50% max.
mangan Mn=0,60% max.
fosfor P=0,10% max.
síra S=0,045% max.
titan Ti=0,30% max.

b) mechanické: mez kluzu $R_{p0,2}$ =102-220 MPa
mez pevnosti R_m =260-350 MPa
tažnost A_{80} =36% min.

2) PLECH S VYŠŠÍ MEZÍ KLUZU K ŽÁROVÉMU POKOVENÍ HX180BD+Z tloušťky 0,77mm

kde je:

H... válcovaný za studena pro tváření za studena

X... způsob válcování (za tepla či za studena) - není předepsán

180... min. hodnota meze kluzu [MPa]

B... Bake-Hardening (170°C, 20min.)

D... určeno k žárovému pokovení

Z... žárově pokovený zinkem

Dle normy ČSN EN 10 143 má tento materiál předepsány tyto hodnoty:

a) chemické: uhlík C=0,04% max.
křemík Si=0,50% max.
mangan Mn=0,70% max.
fosfor P=0,06% max.
síra S=0,025% max.
hliník Al=0,02% min.

b) mechanické: mez kluzu R_e =180-240 MPa
mez pevnosti R_m =300-360 MPa
tažnost A_{80} =34% min.
index BH₂= 35 MPa

3.3. Příprava vzorků

Z tabulí plechu byly na tabulových nůžkách (Obr. 3.3.1) u obou materiálů nastříhány pásy plechů a pomocí výstředníkového lisu (Obr. 3.3.1) byly z těchto plechů zhotoveny normalizované zkušební tyče obdélníkového profilu s rozměry 0,8 x 20 mm dle ČSN EN 10002-1 (Obr. 3.3.2). Od každého plechu bylo vyrobeno celkem 100 kusů normalizovaných zkušebních tyčí. Vzorky byly následně orýsovány na orýsovacím zařízení po 10mm na celé své zkoušené délce, z důvodu nemožnosti použití externího průtahoměru v peci.

V průběhu měření bylo u plechu HX180BD zjištěno, že dochází k prokluzu zkoušené tyče v čelistích trhačího stroje vlivem pozinkované vrstvy, a proto byly ještě následně uchopovací části tyče obroušeny. Broušení probíhalo na stojanové brusce.



Obr. 3.3.1: Použité stroje na výrobu normalizovaných zkušebních tyčí a) tabulové nůžky
b) výstředníkový lis



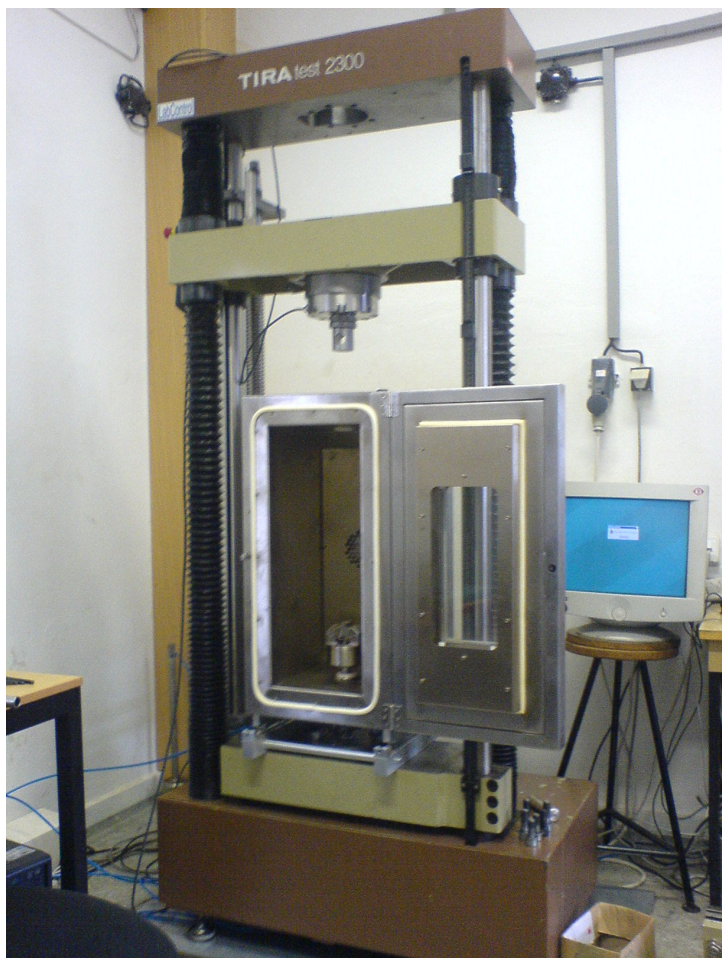
Obr. 3.3.2: Normalizovaná zkušební tyč před a po zkoušce tahem

3.4. Statická zkouška tahem

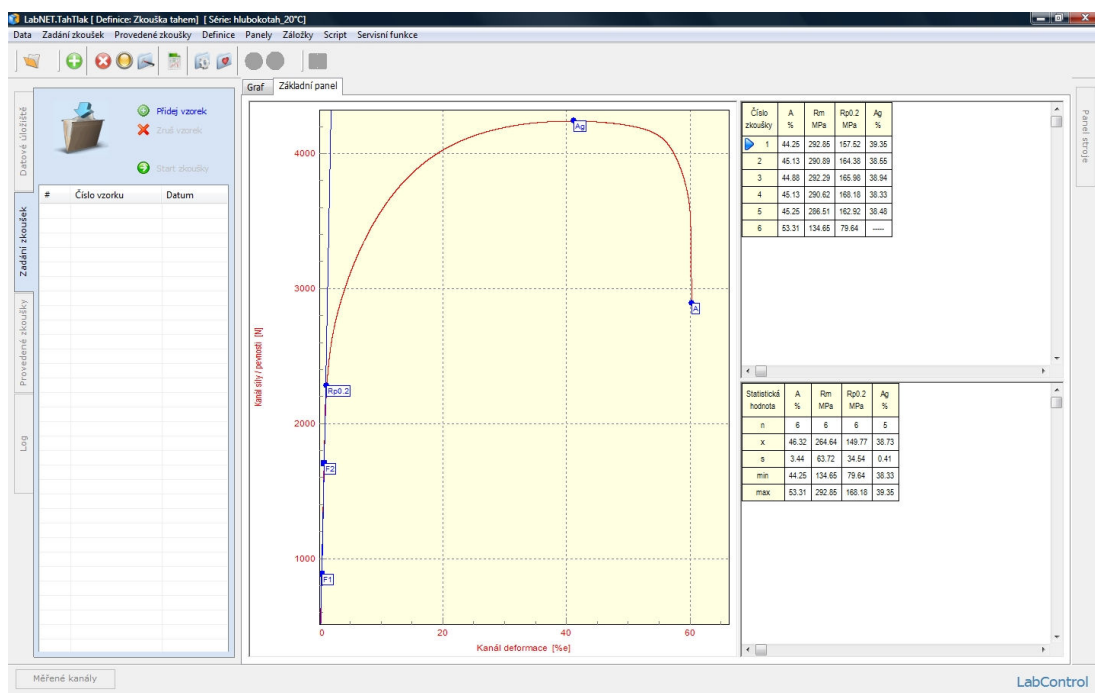
Statická zkouška tahem se prováděla na trhačím stroji TIRA 2300 (Obr. 3.4.1) doplněném o zkušební tepelnou komoru v laboratoři na katedře Strojírenské technologie. Pro oba druhy zkušebních vzorků byla použita stejná rychlost posuvu čelistí zkušebního stroje 10mm/min.

Vzorky byly vyhodnocovány pomocí software LabNET v.4 (Obr. 3.4.2) a postup měření se neměnil. Po dosažení požadované teploty ve zkušební komoře byla dvířka komory rychle otevřena, tyč vložena do uchopovacích čelistí a následně zavřena aby teplota v komoře co nejméně poklesla. Následovalo spuštění programu LabNET v.4, který vyhodnocuje závislost okamžité síly na relativní prodloužení zkušební tyče. Každá zkušební tyč byla po přetržení vyjmuta z trhačího stroje a ručně změřena délka L_u pomocí digitálního posuvného měřítka.

Průměrné hodnoty jsou z jednotlivých měření spolu s příslušnými odchylkami uvedeny v Tab. 3.4.1.1, 3.4.2.1 a diagramy na Obr. 3.4.1.1, 3.4.1.2, 3.4.1.3, 3.4.2.1, 3.4.2.2, 3.4.2.3. Kompletní soubory naměřených výsledků lze nalézt v příloze PŘÍLOHA 1.



Obr. 3.4.1: Trhačí stroj TIRA 2300 se zkušební tepelnou komorou

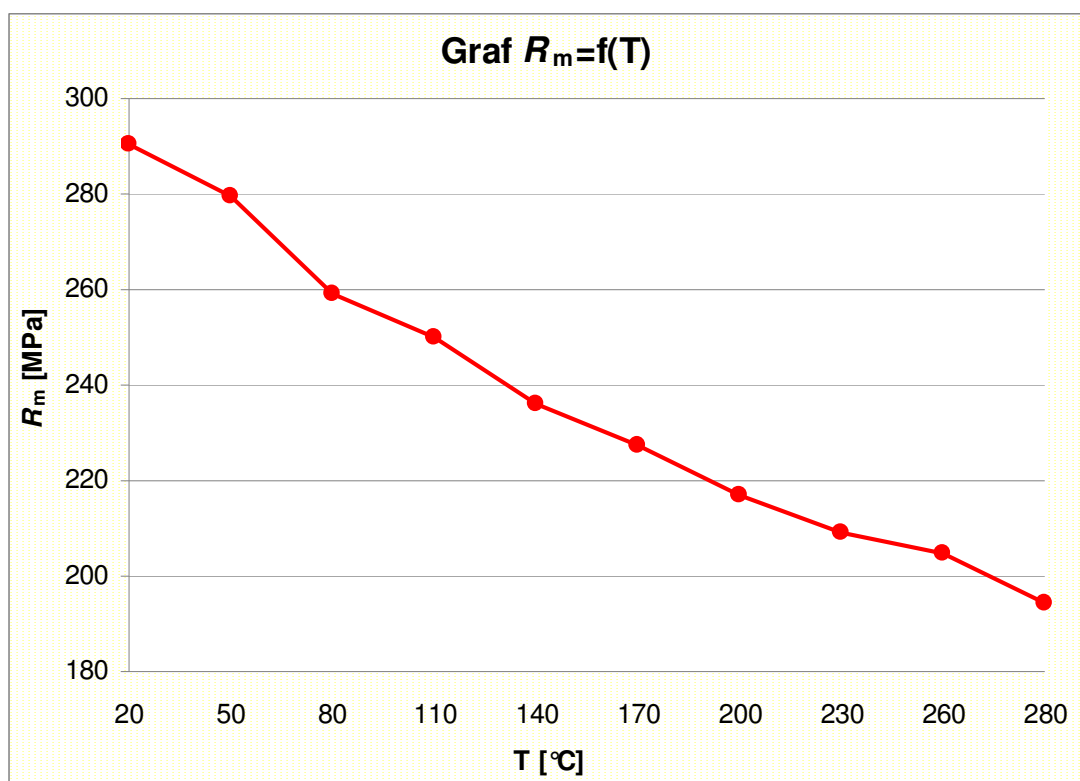


Obr. 3.4.2: LabNET v.4 – grafické rozhraní

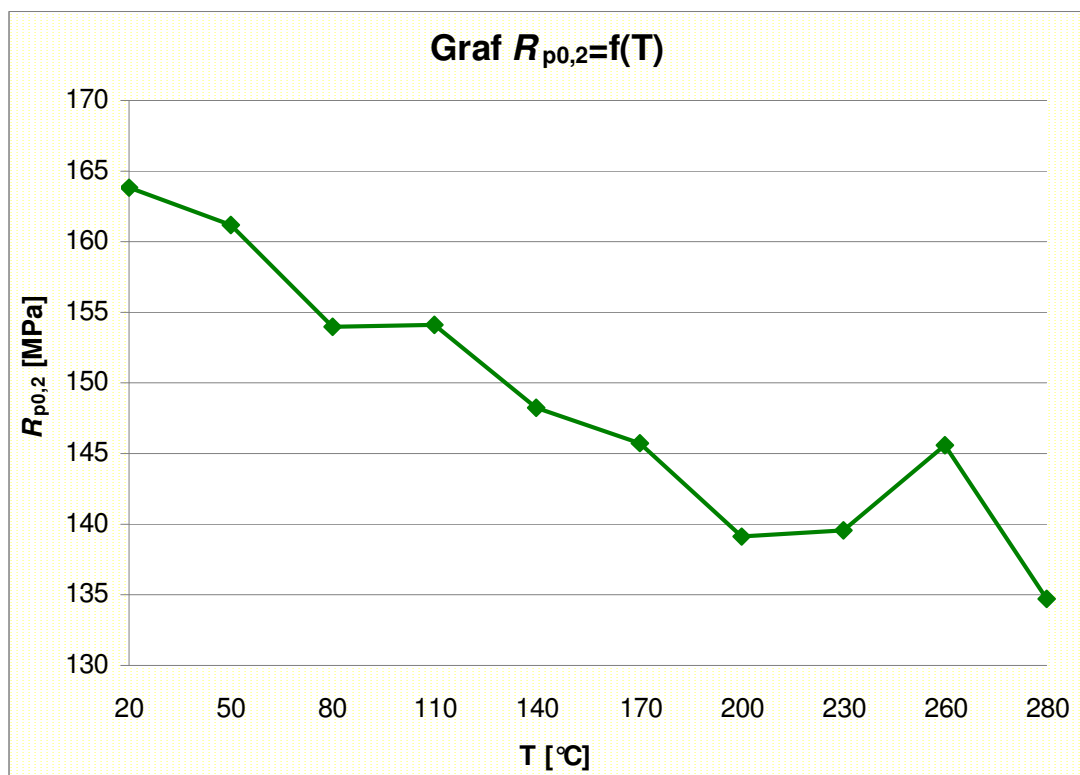
3.4.1. Vyhodnocení naměřených výsledků plechu DX54D+Z100 MC

Tabulka 3.4.1.1: Průměrné hodnoty a odchylky získané tahovou zkouškou

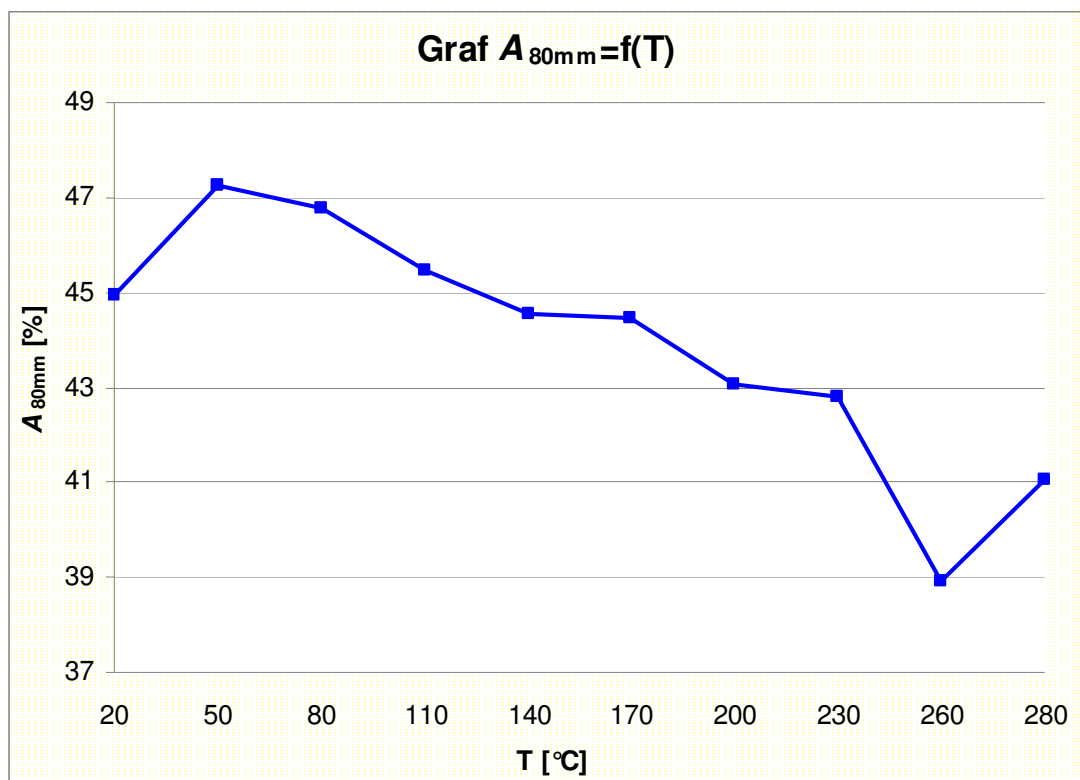
Teplota [°C]		R_m [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	A_{80mm} [%]	Teplota [°C]		R_m [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	A_{80mm} [%]
20		290,63	163,79	44,93	170		227,37	145,78	44,45
	s	2,48	4,01	0,40		s	1,48	3,33	1,38
50		279,61	161,19	47,25	200		217,11	139,08	43,05
	s	1,65	2,73	2,11		s	1,82	6,37	1,56
80		259,28	153,96	46,78	230		208,97	139,56	42,80
	s	3,58	4,97	1,87		s	2,24	5,77	1,74
110		250,10	154,13	45,45	260		204,61	145,55	38,90
	s	3,18	5,53	1,25		s	0,50	2,33	1,37
140		236,25	148,26	44,55	280		194,16	134,67	41,05
	s	1,84	3,87	1,14		s	3,31	4,91	1,32



Obr. 3.4.1.1: Graf závislosti meze pevnosti na teplotě



Obr. 3.4.1.2: Graf závislosti meze kluzu na teplotě

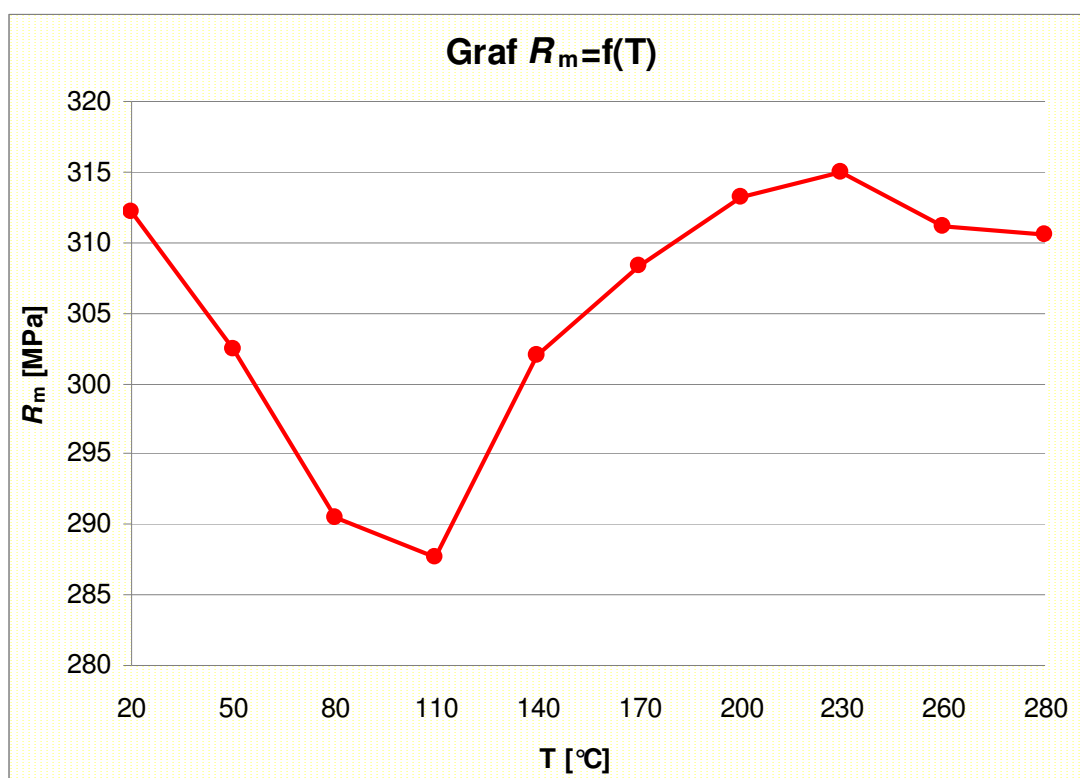


Obr. 3.4.1.3: Graf závislosti tažnosti na teplotě

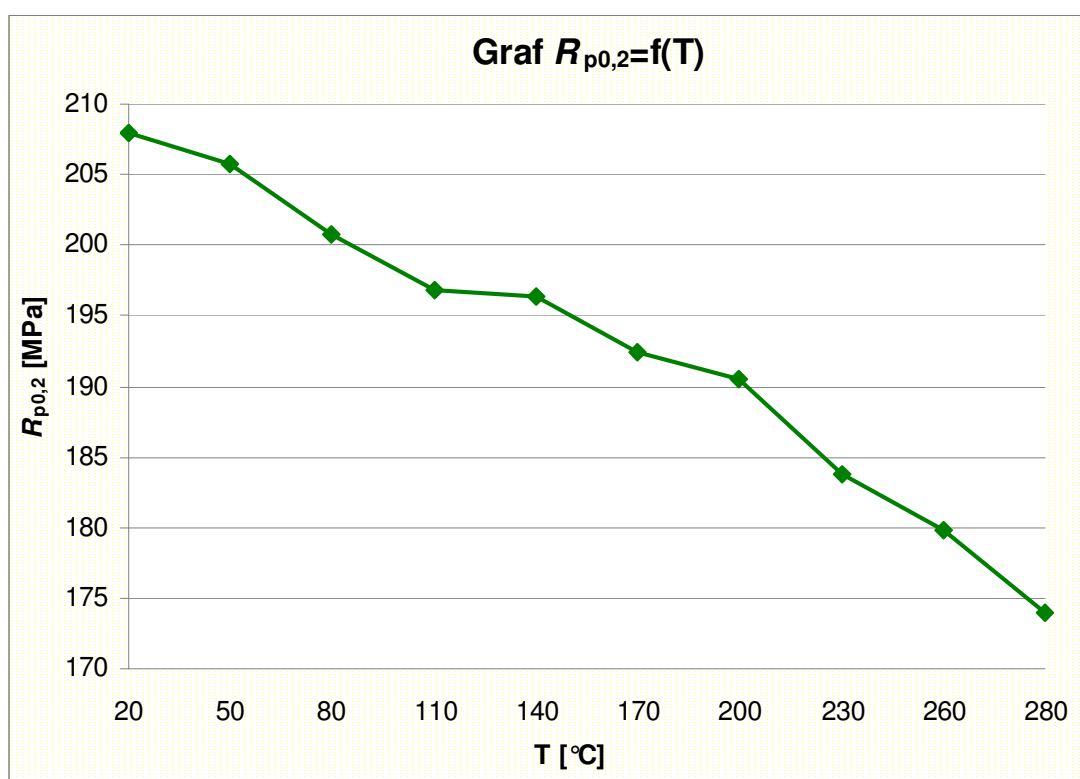
3.4.2. Vyhodnocení naměřených výsledků plechu HX180BD+Z

Tabulka 3.4.2.1: Průměrné hodnoty a odchylky získané tahovou zkouškou

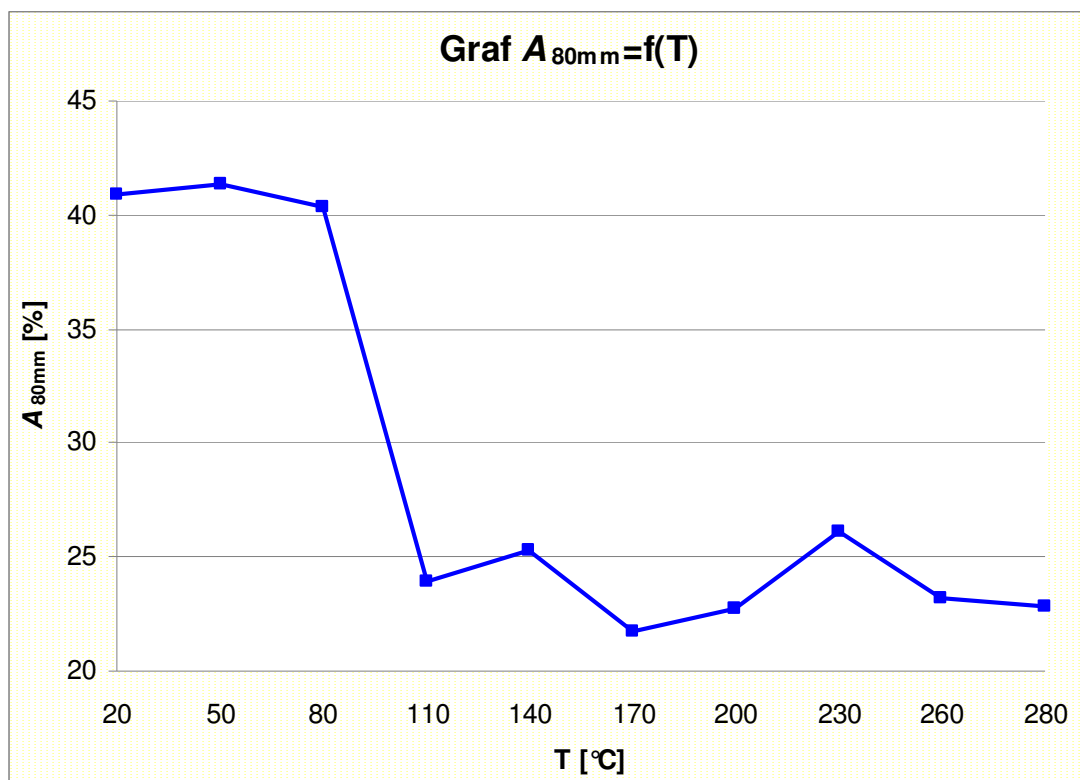
Teplota [°C]		R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A_{80mm} [%]	Teplota [°C]		R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A_{80mm} [%]
20		312,13	207,89	40,93	170		308,40	192,47	21,73
	s	1,42	3,16	0,59		s	0,89	2,25	1,48
50		302,47	205,74	41,35	200		313,24	190,47	22,78
	s	2,15	2,23	0,56		s	1,85	3,14	1,29
80		290,52	200,74	40,30	230		314,94	183,76	26,10
	s	3,58	3,63	2,23		s	6,18	6,38	1,54
110		287,65	196,78	23,95	260		311,14	179,79	23,20
	s	2,75	3,08	1,50		s	3,97	2,72	0,93
140		302,01	196,37	25,25	280		310,50	173,97	22,83
	s	1,05	3,06	1,88		s	0,82	10,11	0,81



Obr. 3.4.2.1: Graf závislosti meze pevnosti na teplotě



Obr. 3.4.2.2: Graf závislosti meze kluzu na teplotě



Obr. 3.4.2.3: Graf závislosti tažnosti na teplotě

3.5. Ověření použitelnosti Kurnakovova teplotního zákona pro mechanické vlastnosti zkoušených plechů

Pro ověření použitelnosti teplotního zákona pro mechanické vlastnosti bylo použito Kurnakovova vzorce:

$$k_0 = k_{0t} \cdot e^{-\alpha(t-t_0)} \quad (2.5.2.2)$$

Protože však hodnoty teplot a mechanických vlastností již byly známy z měření, jedinou neznámou ve vzorci byl tepelný koeficient α , a proto byl vzorec upraven do následující podoby:

$$\alpha = \frac{\ln k_{0t} - \ln k_0}{t_0 - t} \quad [-] \quad (3.5.1)$$

Na výpočet teplotních koeficientů α byly použity referenční hodnoty (t_0 , k_{0t}) naměřené při teplotě 20°C.

Po vypočtení všech teplotních koeficientů α se získala průměrná hodnota α_{pr} (Tab. 3.5.1.1, 3.5.2.1), která poté byla zpět dosazena do Kurnakovova vzorce, aby se mohly průměrné hodnoty naměřené a vypočítané porovnat. V následujících kapitolách jsou zobrazeny tabulky hodnot (Tab. 3.5.1.1, 3.5.1.2, 3.5.2.1, 3.5.2.2) a výsledné grafy (Obr. 3.5.1.1, 3.5.1.2, 3.5.2.1, 3.5.2.2) získané matematickou cestou.

3.5.1. Vyhodnocení vypočtených výsledků pro plech DX54D+Z100 MC

Referenční hodnoty t_0 , k_{0t} pro výpočet α : $t_0=20\text{ °C}$

$$k_{0t}=290,63\text{ MPa } (k_0=R_m)$$

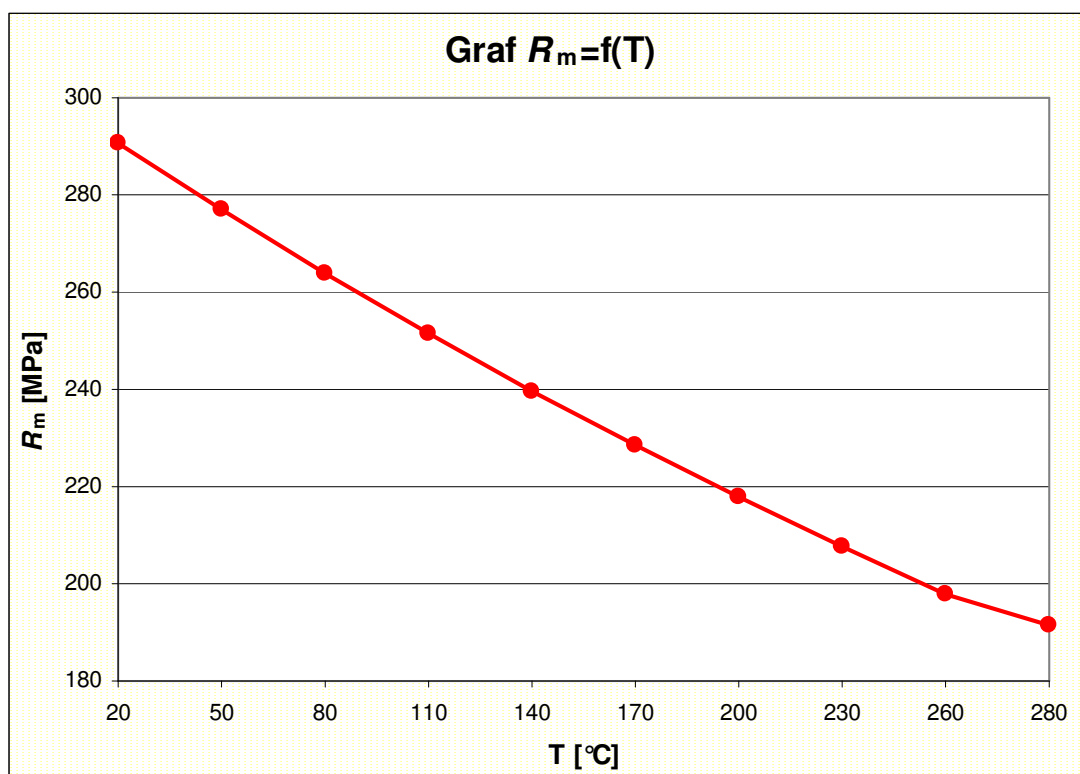
$$k_{0t}=163,79\text{ MPa } (k_0=R_{p0,2})$$

Tabulka 3.5.1.1: Získané hodnoty α a α_{pr}

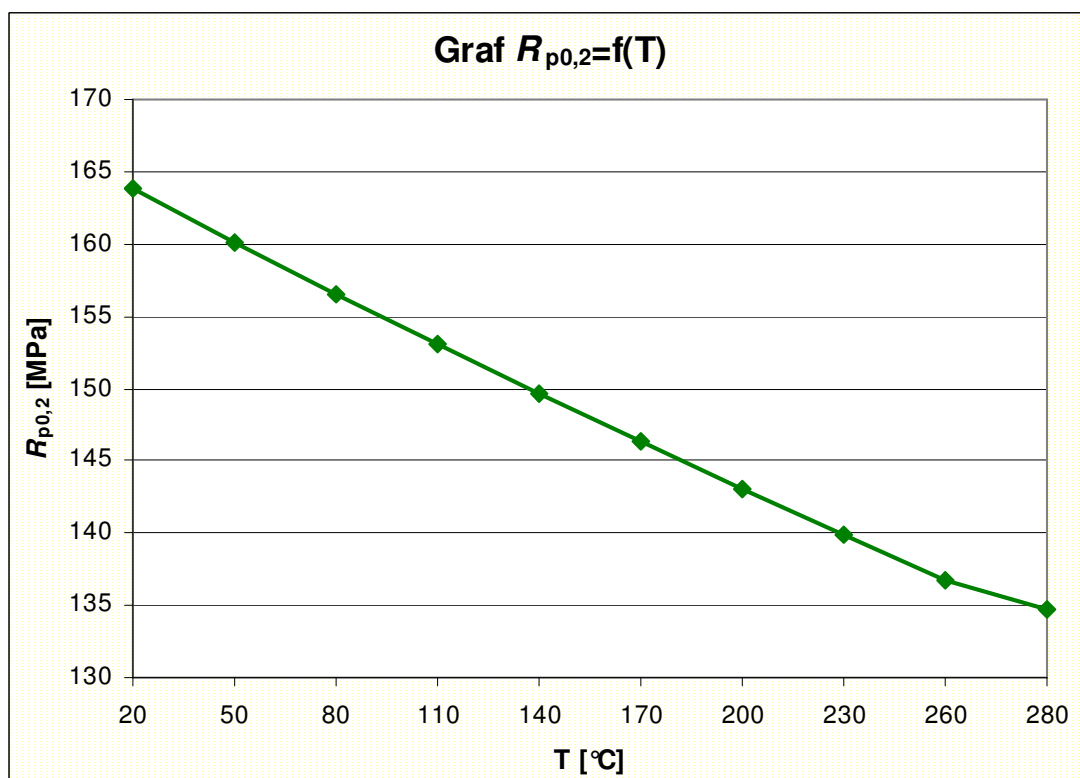
Teplota [°C]	α [-] ($k_0=R_m$)	α [-] ($k_0=R_{p0,2}$)	Teplota [°C]	α [-] ($k_0=R_m$)	α [-] ($k_0=R_{p0,2}$)
50	0,00129	0,00054	200	0,00162	0,00091
80	0,00190	0,00103	230	0,00157	0,00076
110	0,00167	0,00068	260	0,00146	0,00049
140	0,00173	0,00083	280	0,00155	0,00075
170	0,00164	0,00078	Průměr (α_{pr})	0,00160	0,00075

Tabulka 3.5.1.2: Průměrné mechanické hodnoty získané Kurnakovovým vzorcem

Teplota [°C]	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	Teplota [°C]	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]
20	290,63	163,79	170	228,51	146,33
50	276,99	160,14	200	217,78	143,06
80	263,98	156,57	230	207,56	139,87
110	251,58	153,08	260	197,81	136,75
140	239,77	149,66	280	191,57	134,71



Obr. 3.5.1.1: Graf závislosti meze pevnosti na teplotě podle Kurnakovova vzorce



Obr. 3.5.1.2: Graf závislosti meze kluzu na teplotě podle Kurnakovova vzorce

3.5.2. Vyhodnocení vypočtených výsledků pro plech HX180BD+Z

Referenční hodnoty t_0 , k_{0t} pro výpočet α : $t_0=20\text{ °C}$

$$k_{0t}=312,13\text{ MPa } (k_0=R_m)$$

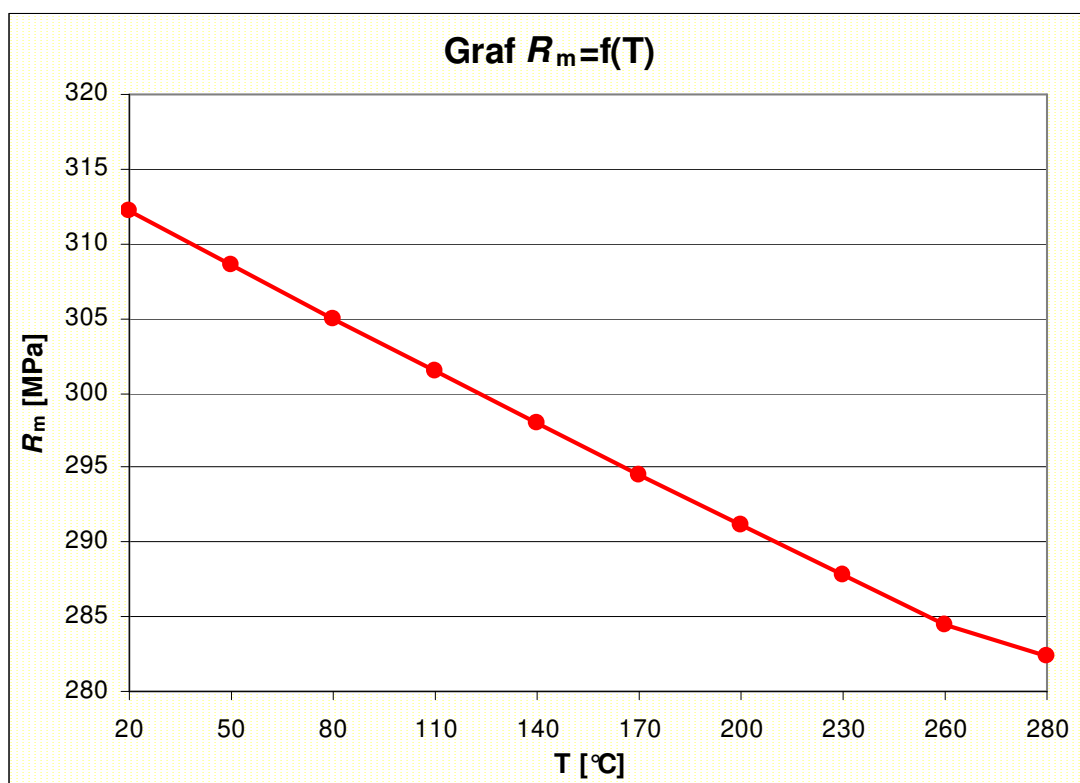
$$k_{0t}=207,89\text{ MPa } (k_0=R_{p0,2})$$

Tabulka 3.5.2.1: Získané hodnoty α a α_{pr}

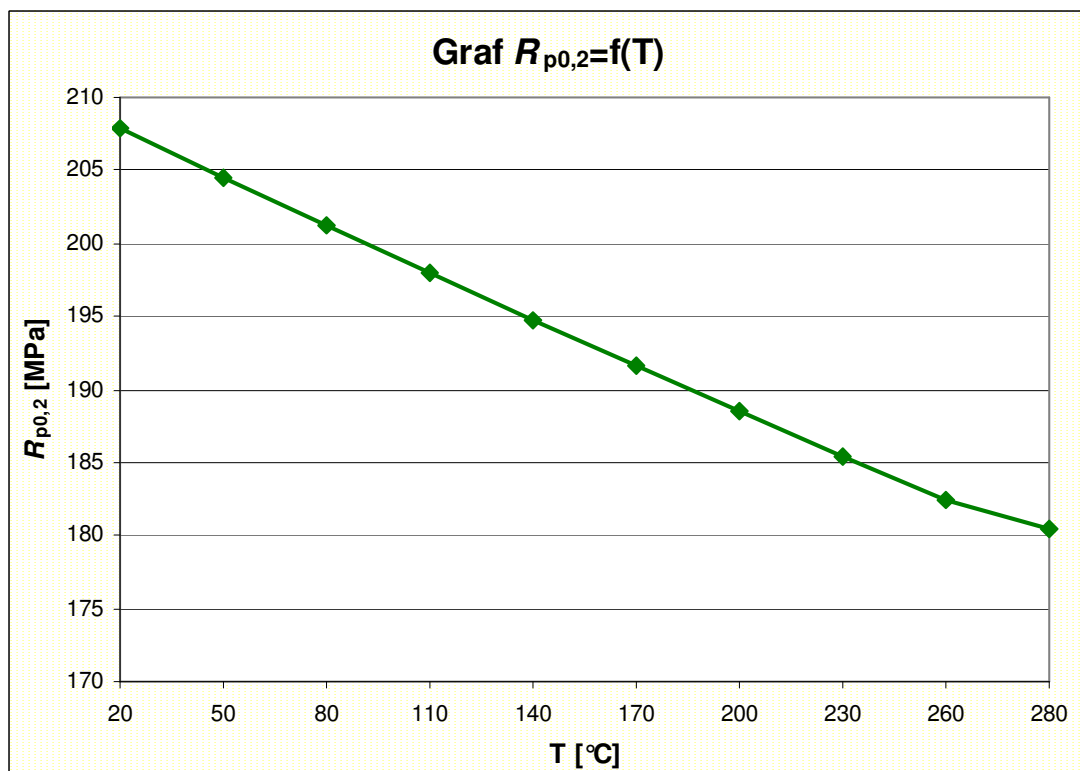
Teplota [°C]	α [-] ($k_0=R_m$)	α [-] ($k_0=R_{p0,2}$)	Teplota [°C]	α [-] ($k_0=R_m$)	α [-] ($k_0=R_{p0,2}$)
50	0,00105	0,00035	200	-0,00002	0,00049
80	0,00120	0,00058	230	-0,00004	0,00059
110	0,00091	0,00061	260	0,00001	0,00061
140	0,00027	0,00048	280	0,00002	0,00069
170	0,00008	0,00051	Průměr (α_{pr})	0,00039	0,00054

Tabulka 3.5.2.2: Průměrné mechanické hodnoty získané Kurnakovovým vzorcem

Teplota [°C]	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	Teplota [°C]	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]
20	312,13	207,89	170	294,56	191,61
50	308,53	204,53	200	291,17	188,51
80	304,98	201,22	230	287,81	185,46
110	301,47	197,96	260	284,49	182,45
140	297,99	194,76	280	282,31	180,49



Obr. 3.5.2.1: Graf závislosti meze pevnosti na teplotě podle Kurnakovova vzorce



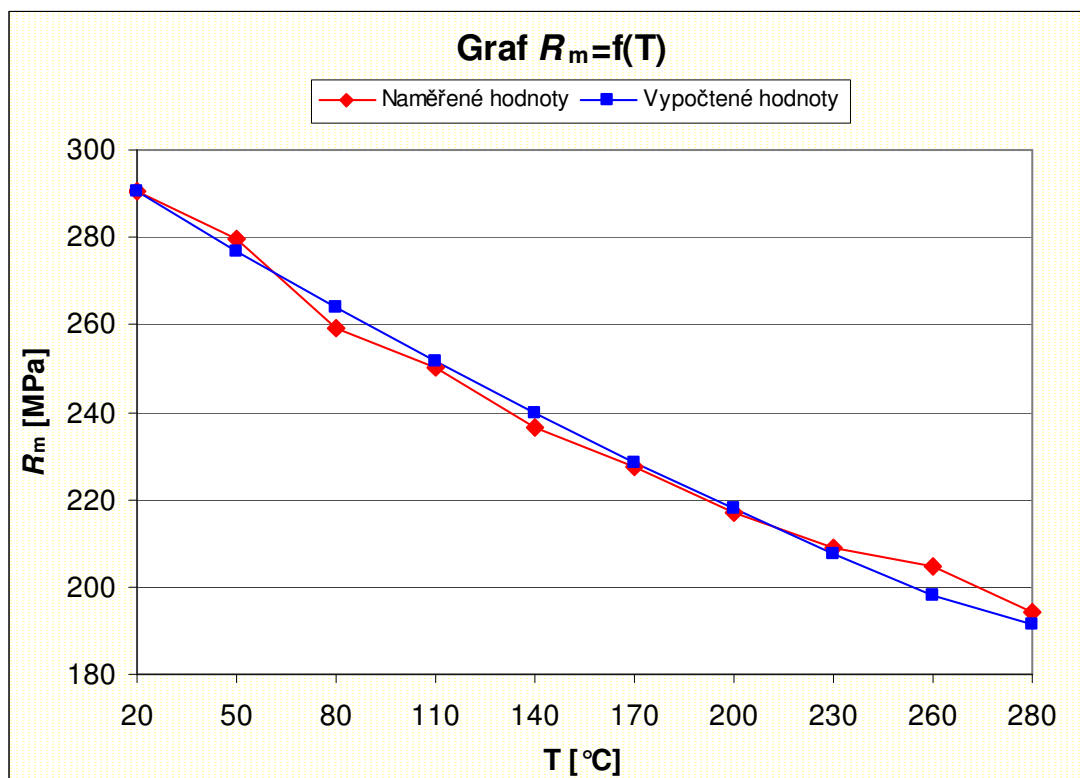
Obr. 3.5.2.2: Graf závislosti meze kluzu na teplotě podle Kurnakovova vzorce

4. DISKUZE VÝSLEDKŮ

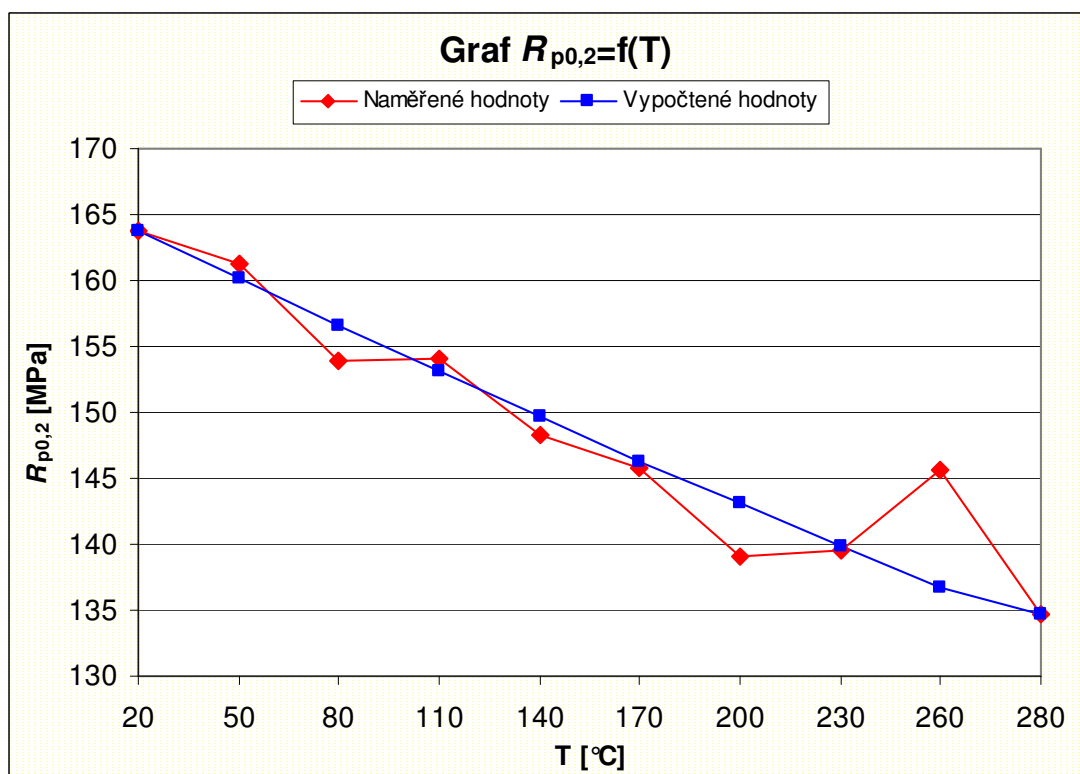
Z naměřených průběhů meze kluzu $R_{p0,2}$, meze pevnosti R_m a tažnosti A_{80mm} v závislosti na teplotě je vidět, že u hlubokotažného materiálu DX54D+Z100 MC nevykazující BH efekt klesá mez kluzu i mez pevnosti s rostoucí teplotou. Pokles mechanických hodnot v tomto rozmezí teplot je v případě meze kluzu 18% a 33% v případě meze pevnosti. Pro teplotu 260°C nastává zvýšení meze kluzu a snížení tažnosti. Vysvětlují si to pochody v materiálu v oblasti tzv. modrého žáru. Tažnost materiálu také klesá s rostoucí teplotou v celém intervalu měřených teplot. Výjimkou je nárůst tažnosti mezi 20-50°C a 260-280°C.

U materiálu HX180BD+Z klesá v celém měřeném rozsahu teplot mez kluzu. Pokles meze kluzu v rozsahu měřených teplot je 16%. Mez pevnosti klesá do teploty 80°C a pak roste až na původní hodnoty naměřené při teplotě 20°C. Tento průběh meze kluzu a meze pevnosti je překvapující. Vzhledem k tomu, že se jedná o materiál vykazující BH efekt, očekával jsem zvýšení meze kluzu v důsledku BH efektu. Pro vznik BH efektu v materiálu na mezi kluzu je třeba pravděpodobně delší časový interval prohřátí vzorku. Průběh zkoušky, kdy se do tepelné komory temperované na požadovanou teplotu založil vzorek a ihned došlo ke spuštění trhacího stroje, neumožňuje vznik BH efektu na mezi kluzu. Průběh meze pevnosti si vysvětlují tím, že v rozmezí teplot 20°C až 110°C dochází k poklesu mechanických hodnot vlivem zvýšené teploty. Teplota je tak malá, že se nestačí uplatnit BH efekt v materiálu. Pro teploty vyšší jak 110°C dochází již k uplatňování vlivu BH efektu a materiál zvyšuje svoje mechanické hodnoty. Důležitý poznatek pro tento materiál je, že v rozmezí teplot 80-110°C dochází k prudkému snížení tažnosti. To má negativní vliv na tvářecí operace.

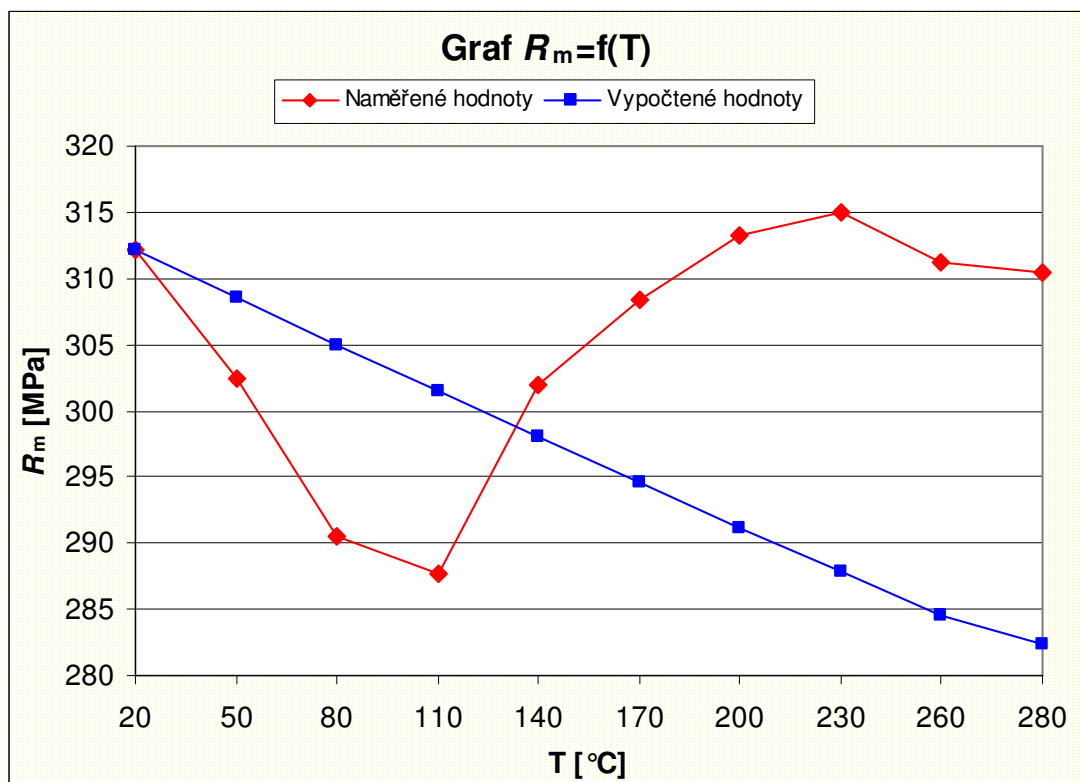
Pro oba materiály byly z naměřených hodnot vypočítány konstanty α_{pr} do Kurnakovova vzorce, který udává změnu mechanických hodnot v závislosti na teplotě. Jak je vidět z grafů 4.1, 4.2 4.3, 4.4, pro materiál DX54D+Z100 MC je tato aproximace poměrně výhodná a lze ji použít. Pro materiál HX180BD+Z vykazující BH efekt je tato aproximace výhodná pouze pro určení meze kluzu. Pro mez pevnosti je tato aproximace zavádějící.



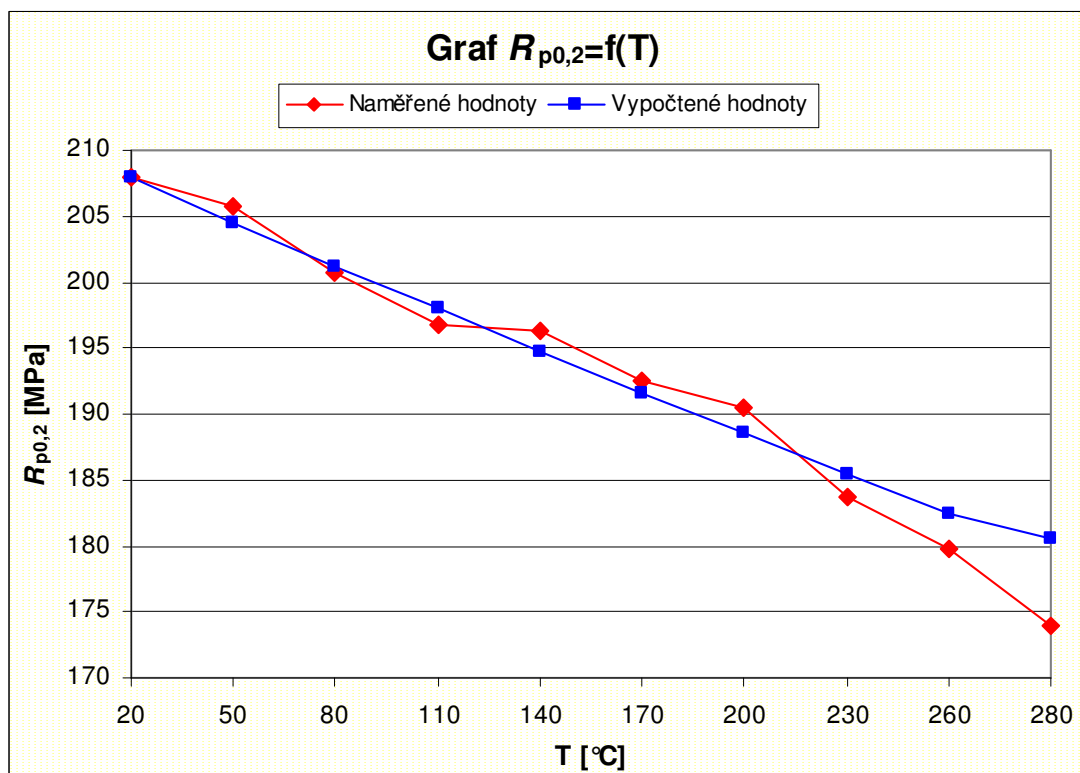
Obr. 4.1: Porovnání závislosti naměřené a vypočtené meze pevnosti na teplotě pro plech DX54D+Z100 MC



Obr. 4.2: Porovnání závislosti naměřené a vypočtené meze kluzu na teplotě pro plech DX54D+Z100 MC



Obr. 4.3: Porovnání závislosti naměřené a vypočtené meze pevnosti na teplotě pro plech HX180BD+Z



Obr. 4.4: Porovnání závislosti naměřené a vypočtené meze kluzu na teplotě pro plech HX180BD+Z

5. ZÁVĚR

Cílem BP, na téma vliv teploty na tvařitelnost hlubokotažných plechů, bylo stanovit pro dva hlubokotažné materiály, zda může teplota nástroje ovlivnit změnu mechanických vlastností a tím i průběh tažení. Teplotní cyklus byl volen záměrně velmi krátký, aby simuloval co nejkratší dobu materiálu v nástroji. Pokud se zaměříme na oblast teplot, které se vyskytují v nástroji nejčastěji (30-80°C), je z experimentu vidět, že i krátkodobé vystavení materiálu teplotnímu cyklu ovlivňuje mechanické hodnoty. Dochází k poklesu meze pevnosti a meze kluzu u materiálu DX54D+Z100 MC v průměru o 11% resp. 6% a u materiálu HX180BD+Z o 7% resp. 3%. Tento pokles mechanických hodnot v rozmezí teplot 20-80°C pravděpodobně nemůže mít zásadní vliv na průběh tažení.

6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BOČEK, J.: *Vliv rychlosti deformace na velikost mezního přetvoření*, Diplomová práce. Liberec : TU v Liberci, 2005. 62 s.
- [2] TU V LIBERCI, KATEDRA STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE : *Vývoj pevnostních materiálů*, [6.10.2008].
<http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/pevnostni%20plechy.pdf>
- [3] PTÁČEK, L., a kol.: *Nauka o materiálu II*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o, 2002. 400 s. ISBN 80-7204-248-3
- [4] LUŇÁČEK, M.: *Vliv velikosti elementu na velikost rozložení deformace v okolí trhliny při tváření vysokopevnostních plechů*, Diplomová práce. Liberec : TU v Liberci, 2006. 71 s.
- [5] ACTA METALLURGICA SLOVACA : *Výskum BH - efektu u ocelových plechov pre automobilový priemysel*, [21.10.2008].
<http://www.ams.tuke.sk/data/ams_online/2002/number2/mag02/mag02.pdf>
- [6] ŽÍDEK, M.; DĚDEK, V.; SOMMER, B.: *Tváření oceli*. Praha : STNL, 1988. 520 s. ISBN 04-408-88
- [7] ALAXIN, J.: *Fyzikální metalurgie I*. Liberec : TU v Liberci, 1987. 265 s. ISBN 55-802-87
- [8] VYTLAČIL, J.: *Vypracování metodiky zjišťování zbytkové deformace výlisku z pevnostních plechů*, Diplomová práce. Liberec : TU v Liberci, 2006. 63 s.
- [9] MACHEK, V.; SODOMKA, J.: *Nauka o materiálu – 2. část*. Praha : ČVUT v Praze, 2007. 142 s. ISBN 978-80-01-03686-0
- [10] PLUHAR, J.; KORITTA, J., a kol.: *Strojírenské materiály*. Praha : SNTL, 1981. 568 s. ISBN 04-208-81
- [11] DRASTÍK, F., a kolektiv.: *Strojnická příručka – svazek 3*. Praha : Verlag Dashöfer, 2003. ISBN 80-86229-65-3
- [12] DRASTÍK, F., a kolektiv.: *Strojnická příručka – svazek 4*. Praha : Verlag Dashöfer, 2004. ISBN 80-86229-65-3
- [13] STROŽEV, MICHAIL V.; POPOV, JEVGENIJ A.: *Teória tvárenia kovov*. Bratislava : ALFA, 1978. 488 s. ISBN 63-560-78
- [14] MACHEK, V.; SODOMKA, J.: *Nauka o materiálu – 1. část*. Praha : ČVUT v Praze, 2006. 177 s. ISBN 80-01-03379-1
- [15] PTÁČEK, L. a kol.: *Nauka o materiálu I*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o, 2003. 522 s. ISBN 80-7204-283-1

- [16] FOREJT, M.: *Teorie tváření*. Brno : Vysoké učení technické, 1992. 167 s. ISBN 80-214-0415-9
- [17] TMĚJ, J.; MIKEŠ, V.: *Teorie tváření*. Liberec : Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1981. 178 s.
- [18] WIMMER, J.: *Využití teplotního pole pro analýzu deformace na výlisku z plechu, Diplomová práce*. Liberec : TU v Liberci, 2007. 88 s.
- [19] FÜRBAACHER, I.: *Lexikon ocelí – svazek 1*. Praha : Verlag Dashöfer, 2007. ISBN 80-86897-12-5

7. SEZNAM PŘÍLOH:

PŘÍLOHA 1: Protokoly ze statické zkoušky tahem TIRAtest 2300

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

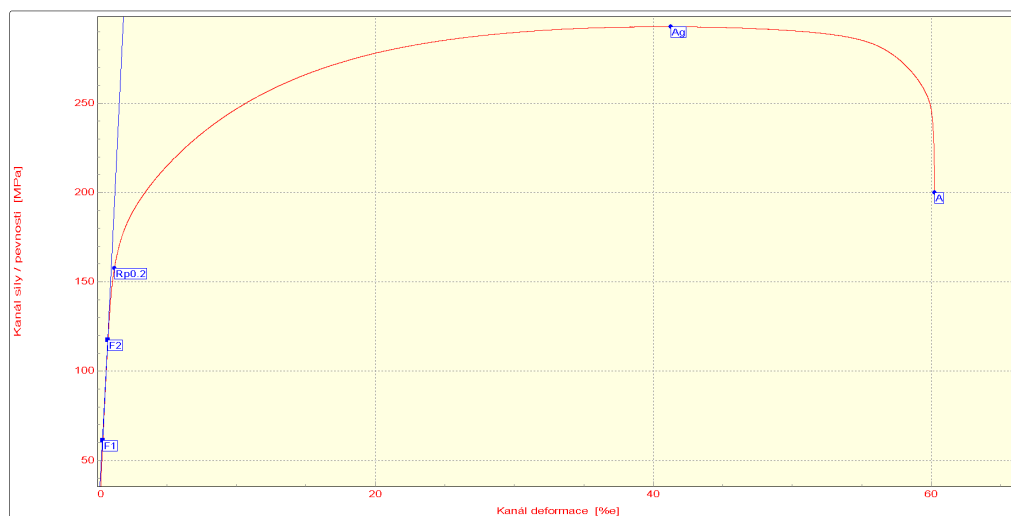
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DX54D+Z100 MC
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (0,8 x 20) mm
Podmínky měření: : 20°C
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Směr odebrání vzorku: : 0°
Vypracoval: : Martin Plešivec
Datum zkoušky: : 22. 4. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
1	44.25	292.85	157.52	39.35
2	45.13	290.89	164.38	38.55
3	44.88	292.29	165.98	38.94
4	45.13	290.62	168.18	38.33
5	45.25	286.51	162.92	38.48

Statistická hodnota	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	44.92	290.63	163.80	38.73
Směrodatná odchylka	0.40	2.48	4.01	0.41



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

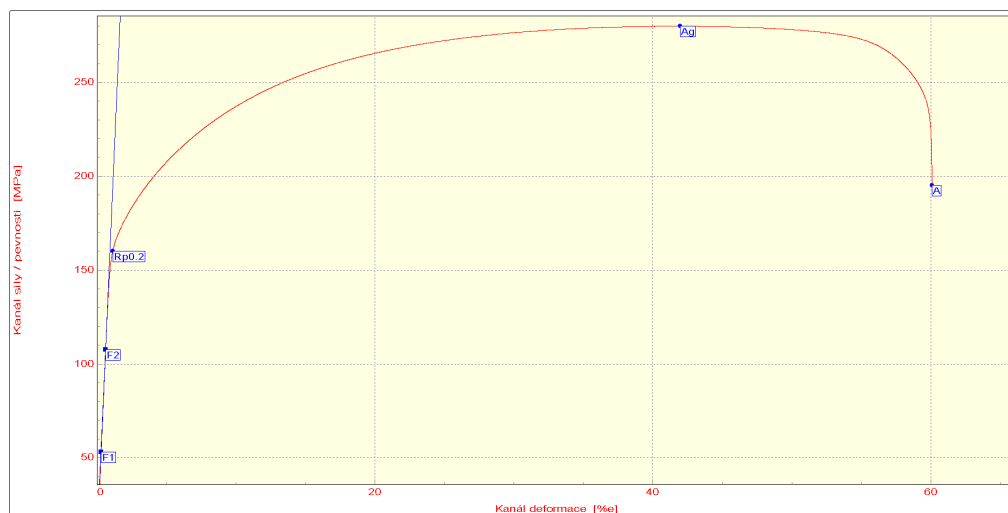
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DX54D+Z100 MC
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (0,8 x 20) mm
Podmínky měření : 50°C
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Směr odebrání vzorku : 0°
Vypracoval: : Martin Plešivec
Datum zkoušky: : 22. 4. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
1	45.63	279.88	160.01	40.33
2	46.75	281.32	164.81	39.54
3	45.63	280.22	157.41	40.64
4	47.50	276.86	162.02	41.03
5	50.75	279.75	161.69	40.73

Statistická hodnota	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	47.25	279.61	161.19	40.46
Směrodatná odchylka	2.11	1.65	2.73	0.57



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

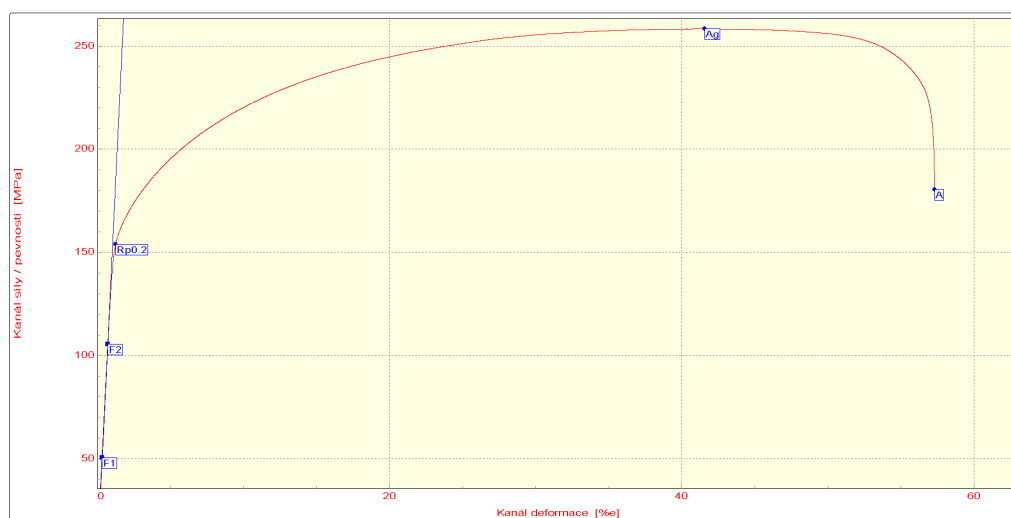
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DX54D+Z100 MC
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (0,8 x 20) mm
Podmínky měření : 80°C
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Směr odebrání vzorku : 0°
Vypracoval: : Martin Plešivec
Datum zkoušky: : 22. 4. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
1	44.25	258.23	154.00	39.78
2	45.38	259.53	148.01	40.61
3	48.38	259.17	152.54	41.02
4	47.50	264.72	161.78	41.68
5	48.38	254.75	153.45	41.37

Statistická hodnota	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	46.78	259.28	153.96	40.89
Směrodatná odchylka	1.87	3.58	4.97	0.74



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

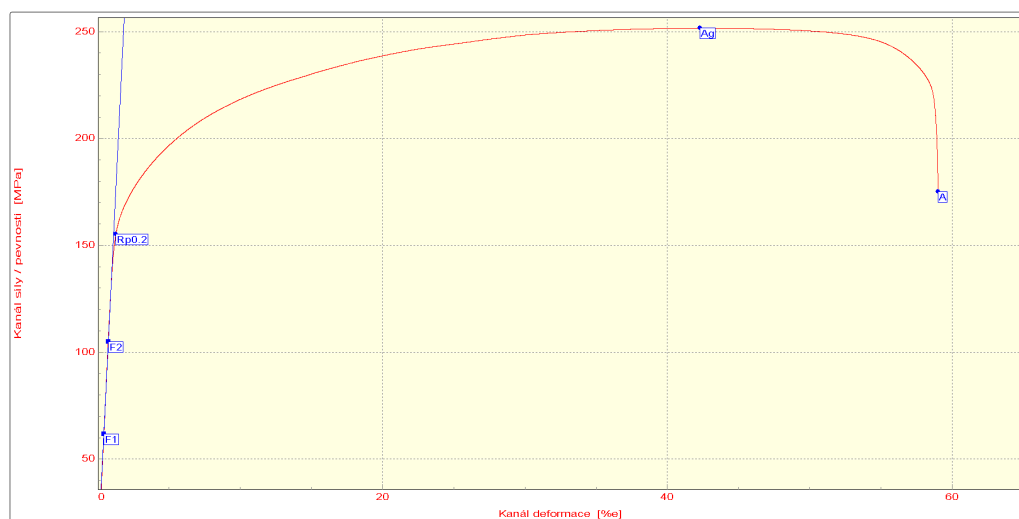
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DX54D+Z100 MC
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (0,8 x 20) mm
Podmínky měření: : 110°C
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Směr odebrání vzorku: : 0°
Vypracoval: : Martin Plešivec
Datum zkoušky: : 22. 4. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
1	43.75	251.74	154.71	37.16
2	44.75	251.63	155.34	40.57
3	45.50	251.95	157.62	41.30
4	46.38	244.47	144.59	41.41
5	46.88	250.72	158.39	41.50

Statistická hodnota	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	45.45	250.10	154.13	40.39
Směrodatná odchylka	1.25	3.18	5.55	1.84



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

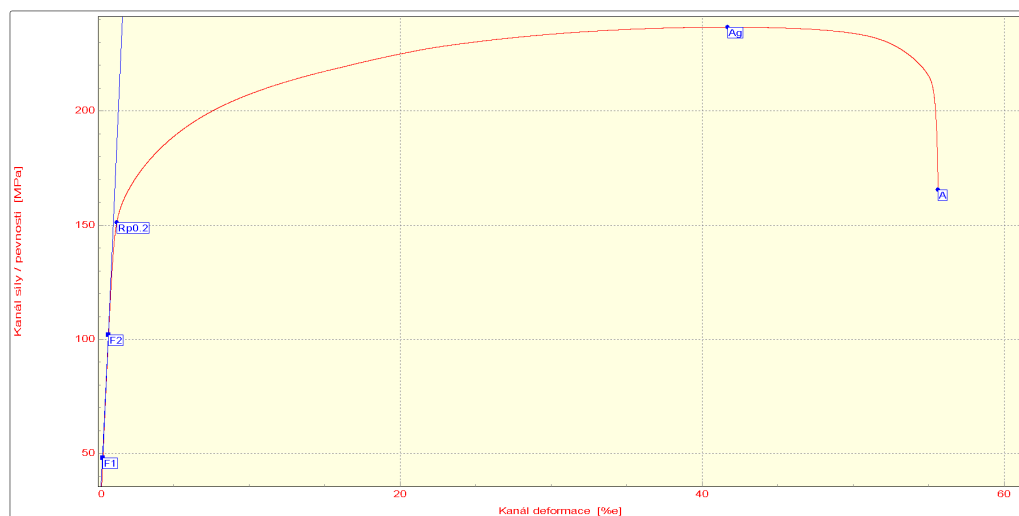
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DX54D+Z100 MC
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (0,8 x 20) mm
Podmínky měření: : 140°C
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Směr odebrání vzorku: : 0°
Vypracoval: : Martin Plešivec
Datum zkoušky: : 22. 4. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
1	42.88	236.72	151.13	40.05
2	44.75	236.19	146.98	40.33
3	44.00	235.96	146.67	41.03
4	45.63	233.62	143.39	42.01
5	45.50	238.77	153.13	41.37

Statistická hodnota	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	44.55	236.25	148.26	40.96
Směrodatná odchylka	1.14	1.84	3.87	0.79



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

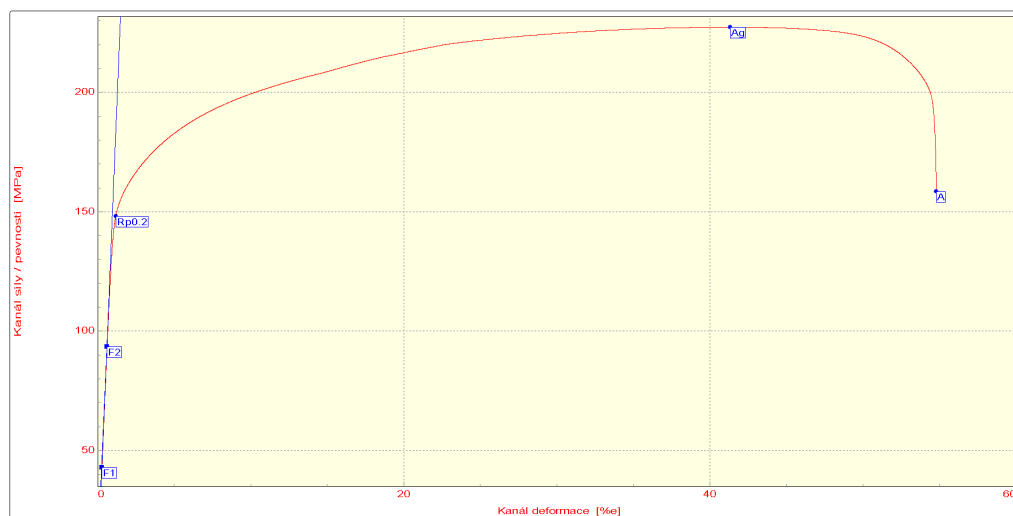
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DX54D+Z100 MC
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (0,8 x 20) mm
Podmínky měření: : 170°C
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Směr odebrání vzorku: : 0°
Vypracoval: : Martin Plešivec
Datum zkoušky: : 22. 4. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
1	42.38	227.32	147.99	39.82
2	43.75	226.69	144.81	40.29
3	45.75	226.39	140.63	41.41
4	45.13	226.50	146.26	41.55
5	45.25	229.93	149.20	41.91

Statistická hodnota	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	44.45	227.37	145.78	41.00
Směrodatná odchylka	1.38	1.48	3.33	0.90



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

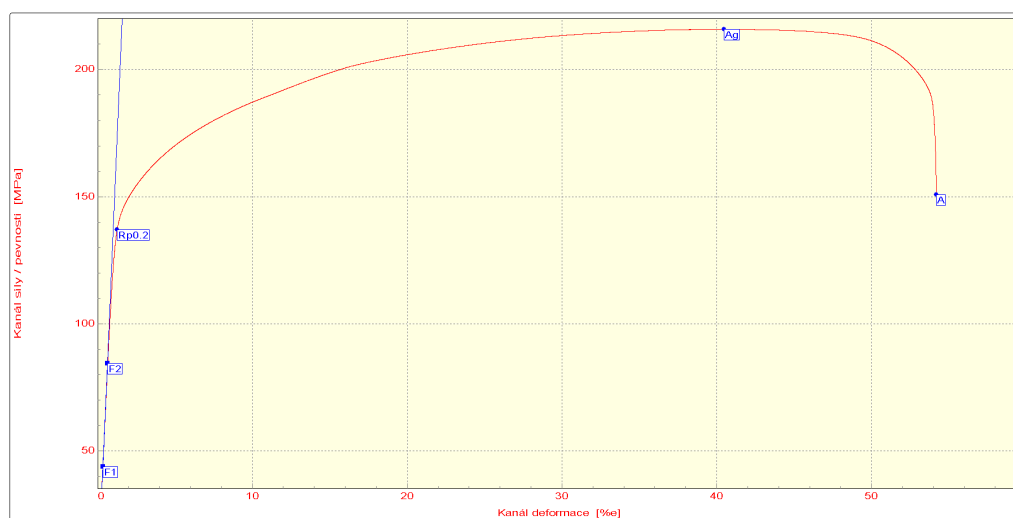
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DX54D+Z100 MC
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (0,8 x 20) mm
Podmínky měření: : 200°C
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Směr odebrání vzorku: : 0°
Vypracoval: : Martin Plešivec
Datum zkoušky: : 22. 4. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
1	41.75	215.88	137.03	38.81
2	41.88	217.88	144.62	40.33
3	42.13	219.51	146.92	40.18
4	44.63	217.48	134.25	40.77
5	44.88	214.81	132.56	39.80

Statistická hodnota	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	43.05	217.11	139.08	39.98
Směrodatná odchylka	1.56	1.82	6.37	0.74



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

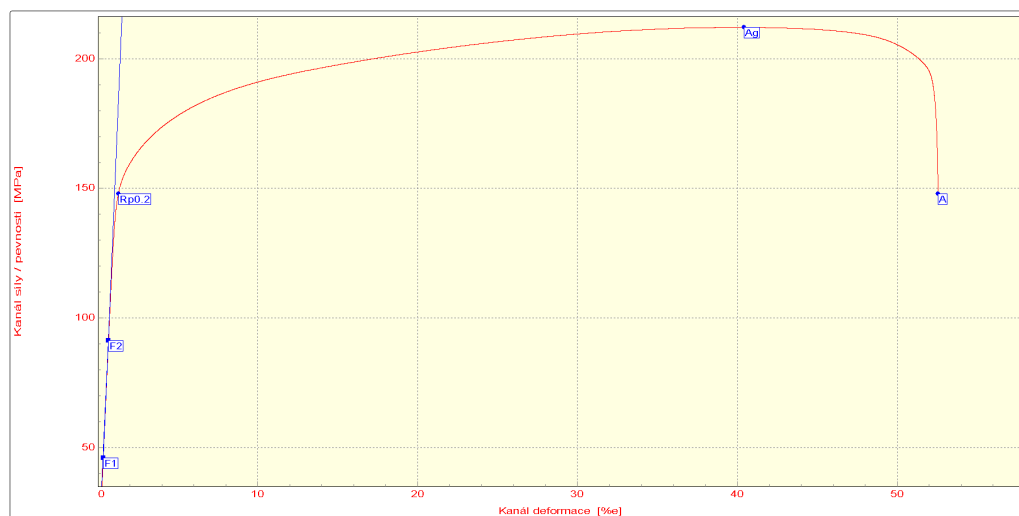
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DX54D+Z100 MC
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (0,8 x 20) mm
Podmínky měření: : 230°C
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Směr odebrání vzorku: : 0°
Vypracoval: : Martin Plešivec
Datum zkoušky: : 22. 4. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
1	40.13	212.14	147.91	38.89
2	42.88	207.14	137.14	38.32
3	42.38	208.93	140.79	39.56
4	44.00	210.04	139.89	39.80
5	44.63	206.62	132.08	39.66

Statistická hodnota	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	42.80	208.97	139.56	39.25
Směrodatná odchylka	1.74	2.24	5.77	0.63



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

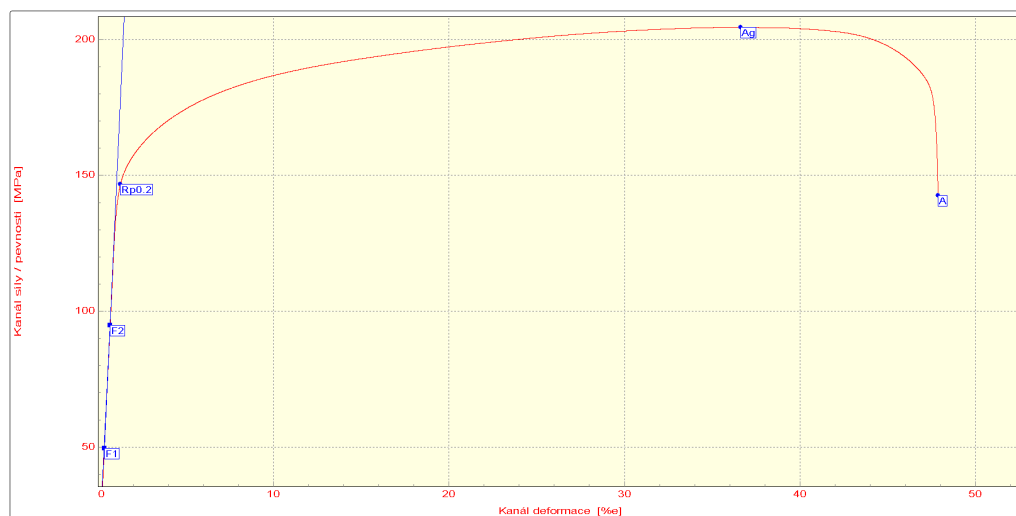
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DX54D+Z100 MC
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (0,8 x 20) mm
Podmínky měření : 260°C
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Směr odebrání vzorku : 0°
Vypracoval: : Martin Plešivec
Datum zkoušky: : 22. 4. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
1	36.88	205.07	146.06	32.61
2	38.13	204.49	146.75	35.10
3	39.50	204.06	142.32	36.51
4	39.88	205.20	148.37	37.53
5	40.13	204.22	144.24	38.14

Statistická hodnota	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	38.90	204.61	145.55	35.98
Směrodatná odchylka	1.37	0.50	2.33	2.21



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

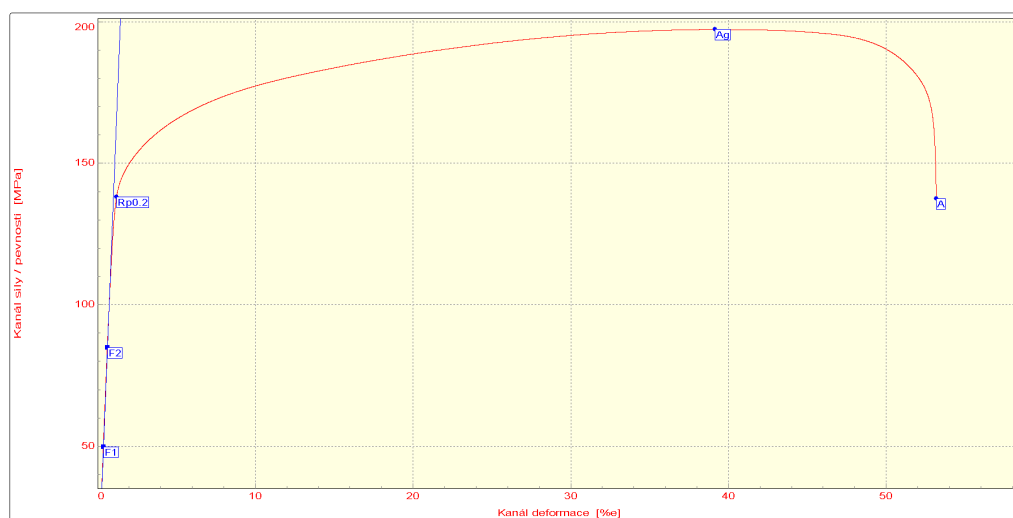
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DX54D+Z100 MC
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (0,8 x 20) mm
Podmínky měření : 280°C
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Směr odebrání vzorku : 0°
Vypracoval: : Martin Plešivec
Datum zkoušky: : 22. 4. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
1	38.75	189.94	134.11	37.91
2	41.25	197.28	138.09	37.72
3	42.00	191.91	128.37	38.18
4	41.38	197.51	140.80	37.83
5	41.88	194.16	131.97	36.89

Statistická hodnota	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	41.05	194.16	134.67	37.71
Směrodatná odchylka	1.32	3.31	4.91	0.49



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

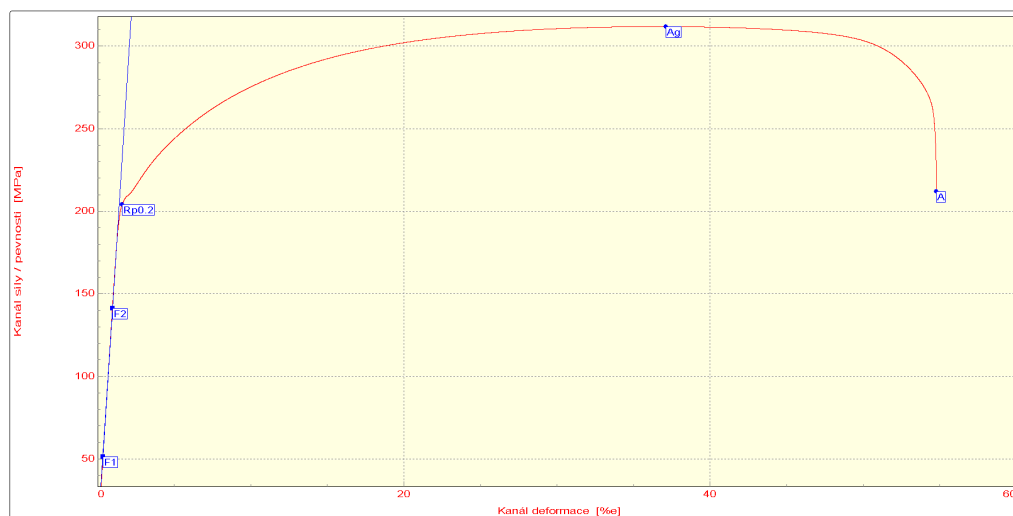
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : HX180BD+Z
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (0,8 x 20) mm
Podmínky měření: : 20°C
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Směr odebrání vzorku: : 0°
Vypracoval: : Martin Plešivec
Datum zkoušky: : 22. 4. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
1	41.13	311.88	204.00	35.00
2	41.00	312.35	206.17	34.41
3	41.63	314.28	212.32	34.59
4	40.00	311.79	209.33	33.40
5	40.88	310.35	207.66	34.13

Statistická hodnota	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	40.92	312.13	207.89	34.30
Směrodatná odchylka	0.59	1.42	3.16	0.60



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

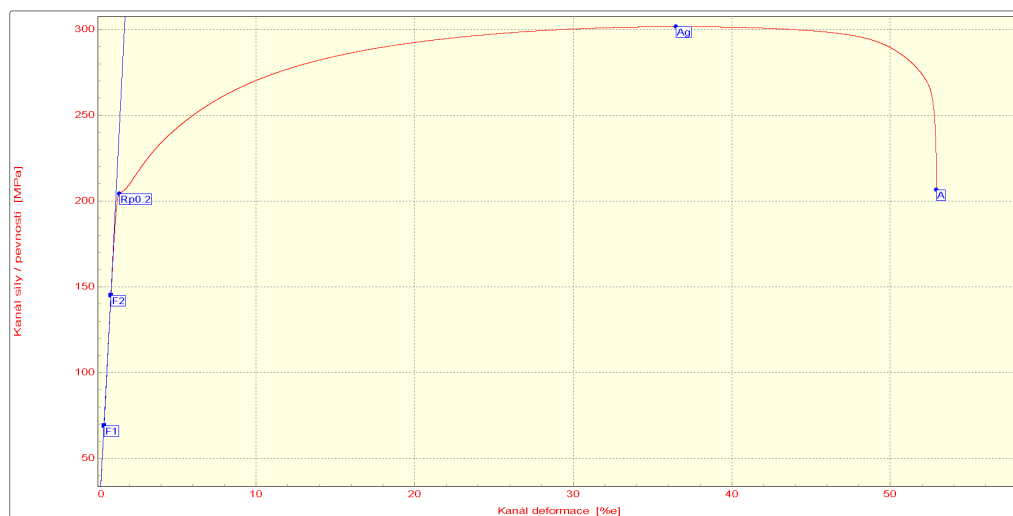
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : HX180BD+Z
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (0,8 x 20) mm
Podmínky měření: : 50°C
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Směr odebrání vzorku: : 0°
Vypracoval: : Martin Plešivec
Datum zkoušky: : 22. 4. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
1	40.88	301.66	204.29	34.72
2	40.88	301.90	206.02	36.25
3	41.13	300.96	204.02	36.51
4	41.75	301.55	204.87	35.93
5	42.13	306.27	209.49	36.79

Statistická hodnota	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	41.35	302.47	205.74	36.04
Směrodatná odchylka	0.56	2.15	2.23	0.80



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

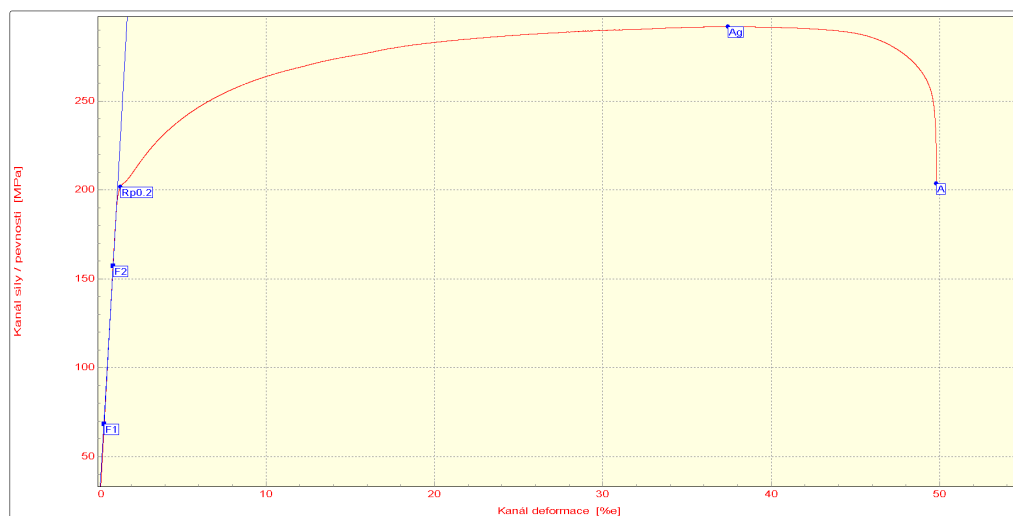
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : HX180BD+Z
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (0,8 x 20) mm
Podmínky měření: : 80°C
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Směr odebrání vzorku: : 0°
Vypracoval: : Martin Plešivec
Datum zkoušky: : 22. 4. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
1	38.50	291.83	201.78	35.75
2	39.13	290.51	202.13	36.53
3	38.50	284.52	195.45	39.50
4	43.25	293.97	205.15	37.13
5	42.13	291.80	199.21	36.67

Statistická hodnota	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	40.30	290.52	200.74	37.12
Směrodatná odchylka	2.23	3.58	3.63	1.42



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

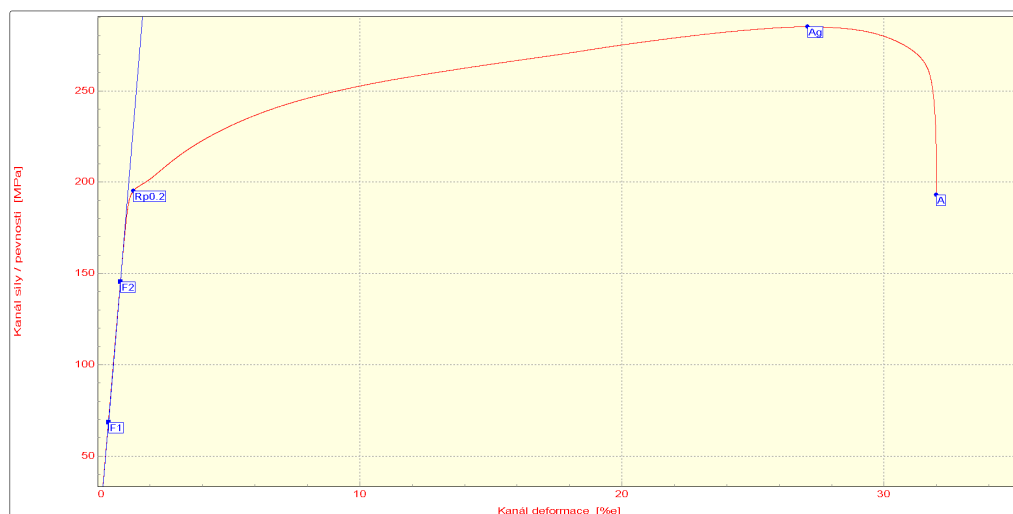
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : HX180BD+Z
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (0,8 x 20) mm
Podmínky měření: : 110°C
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Směr odebrání vzorku: : 0°
Vypracoval: : Martin Plešivec
Datum zkoušky: : 22. 4. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
1	25.13	287.64	197.81	29.58
2	21.63	285.12	195.23	25.37
3	24.88	287.93	197.31	29.41
4	24.88	292.05	200.93	29.01
5	23.25	285.53	192.64	28.43

Statistická hodnota	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	23.95	287.65	196.79	28.36
Směrodatná odchylka	1.50	2.75	3.08	1.73



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

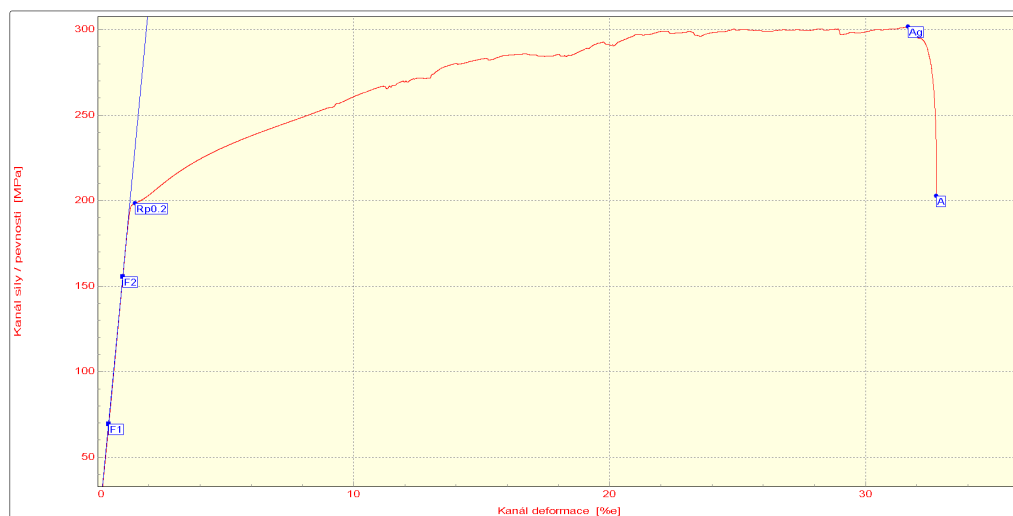
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : HX180BD+Z
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (0,8 x 20) mm
Podmínky měření: : 140°C
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Směr odebrání vzorku: : 0°
Vypracoval: : Martin Plešivec
Datum zkoušky: : 22. 4. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
1	27.25	301.05	195.64	40.53
2	23.50	301.25	198.62	26.15
3	25.00	301.71	198.30	29.75
4	27.13	302.42	198.00	35.92
5	23.38	303.64	191.31	26.97

Statistická hodnota	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	25.25	302.01	196.37	31.86
Směrodatná odchylka	1.88	1.05	3.06	6.18



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

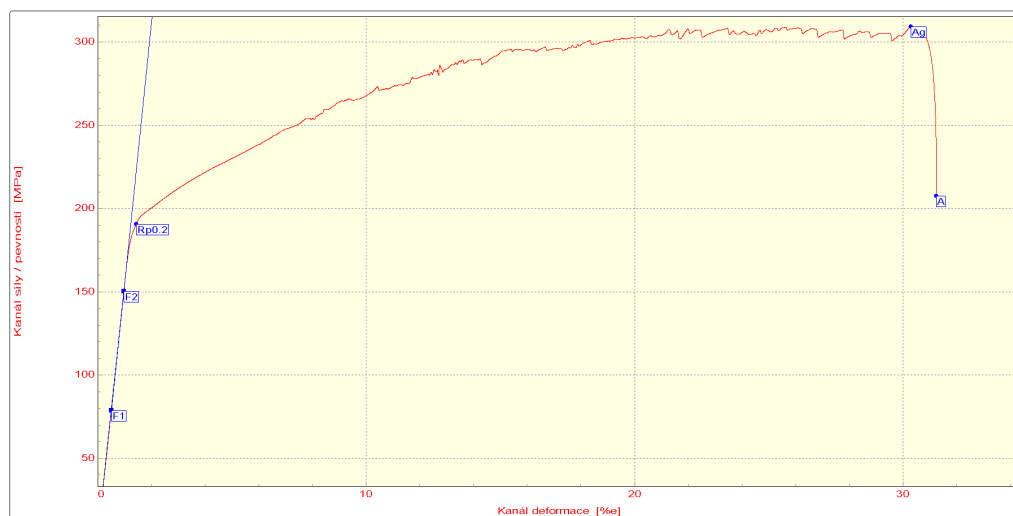
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : HX180BD+Z
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (0,8 x 20) mm
Podmínky měření: : 170°C
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Směr odebrání vzorku: : 0°
Vypracoval: : Martin Plešivec
Datum zkoušky: : 22. 4. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
1	20.50	309.23	190.66	28.28
2	22.63	309.40	189.51	27.97
3	22.25	307.35	194.31	26.25
4	23.38	307.81	194.46	26.41
5	19.88	308.22	193.40	23.11

Statistická hodnota	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	21.73	308.40	192.47	26.41
Směrodatná odchylka	1.48	0.89	2.25	2.05



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

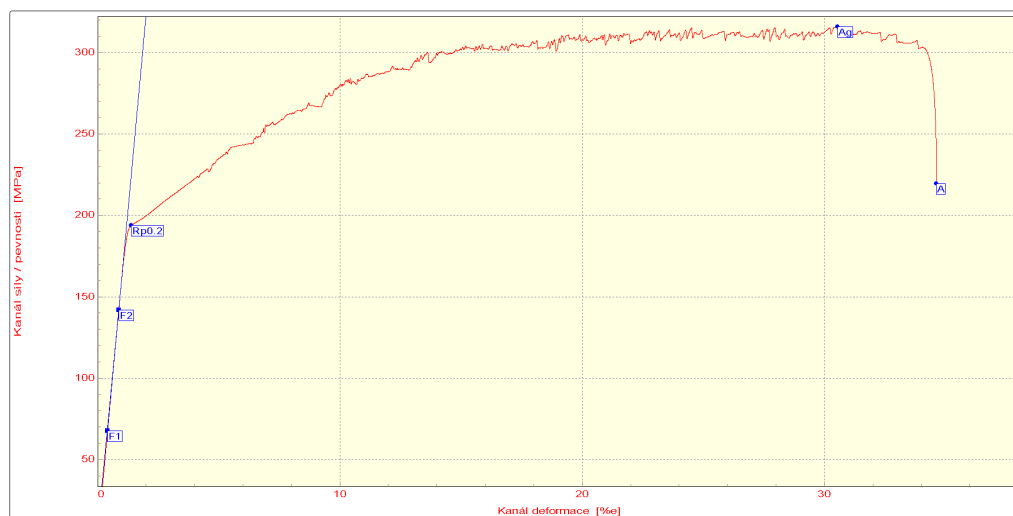
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : HX180BD+Z
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (0,8 x 20) mm
Podmínky měření: : 200°C
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Směr odebrání vzorku: : 0°
Vypracoval: : Martin Plešivec
Datum zkoušky: : 22. 4. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
1	22.88	310.83	191.91	26.90
2	21.38	315.96	193.74	28.60
3	21.75	312.58	185.33	24.03
4	24.63	313.32	190.93	24.14
5	23.25	313.53	190.46	25.81

Statistická hodnota	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	22.77	313.24	190.47	25.89
Směrodatná odchylka	1.29	1.85	3.14	1.93



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

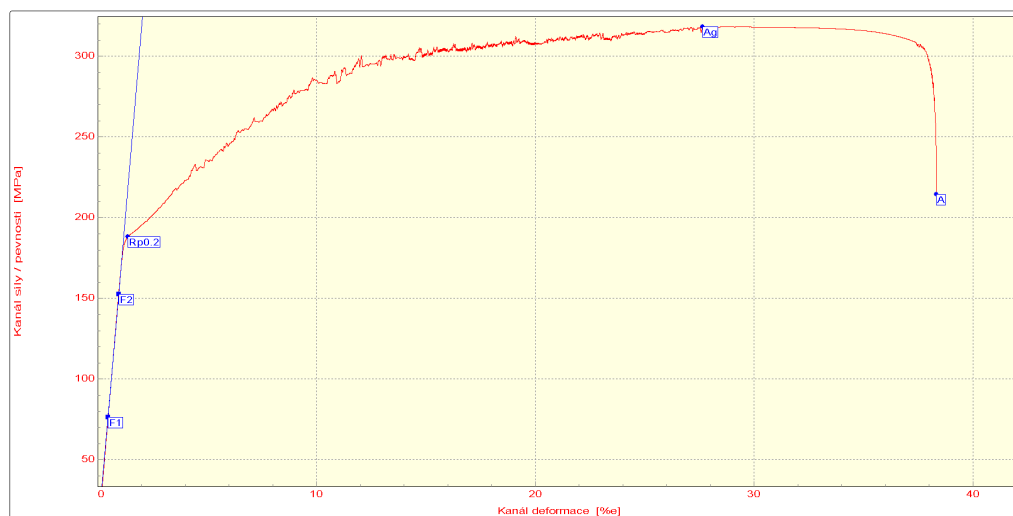
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : HX180BD+Z
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (0,8 x 20) mm
Podmínky měření: : 230°C
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Směr odebrání vzorku: : 0°
Vypracoval: : Martin Plešivec
Datum zkoušky: : 22. 4. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
1	27.88	304.01	173.91	28.32
2	23.63	318.36	190.38	27.27
3	26.50	318.46	188.15	25.65
4	26.13	316.21	184.18	28.97
5	26.38	317.64	182.17	28.95

Statistická hodnota	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	26.10	314.94	183.76	27.83
Směrodatná odchylka	1.54	6.18	6.38	1.40



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

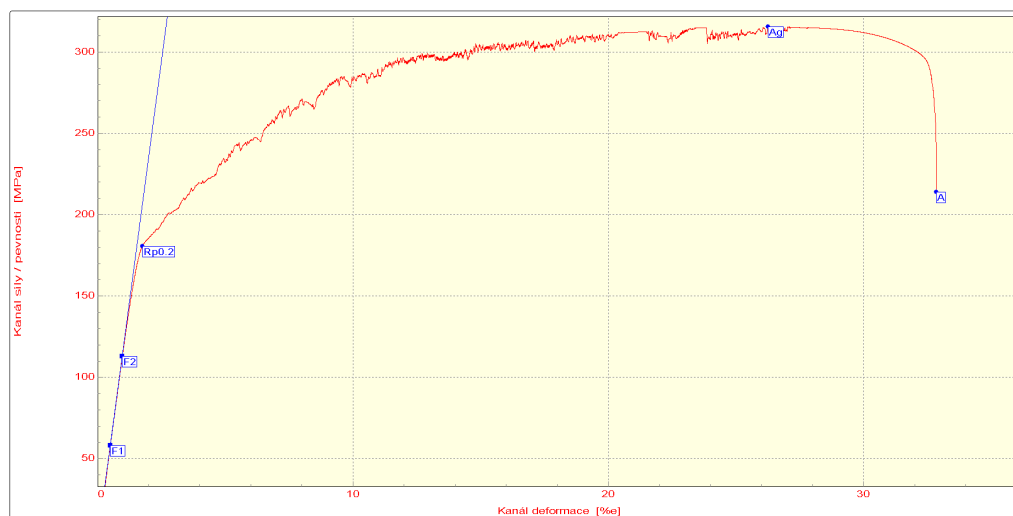
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : HX180BD+Z
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (0,8 x 20) mm
Podmínky měření: : 260°C
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Směr odebrání vzorku: : 0°
Vypracoval: : Martin Plešivec
Datum zkoušky: : 22. 4. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
1	24.25	306.19	180.43	23.25
2	22.13	309.97	177.89	20.41
3	22.38	315.63	180.63	23.54
4	23.88	309.17	176.47	20.39
5	23.38	314.76	183.51	21.28

Statistická hodnota	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	23.20	311.14	179.79	21.77
Směrodatná odchylka	0.93	3.97	2.72	1.53



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

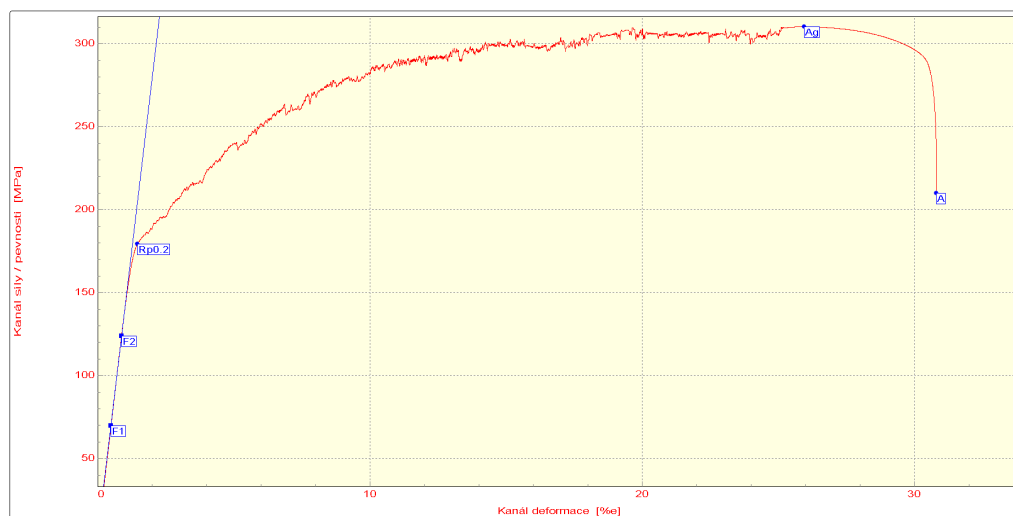
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : HX180BD+Z
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (0,8 x 20) mm
Podmínky měření: : 280°C
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Směr odebrání vzorku: : 0°
Vypracoval: : Martin Plešivec
Datum zkoušky: : 22. 4. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
1	22.63	311.51	156.45	20.30
2	22.25	310.75	182.00	21.66
3	22.50	309.23	175.67	22.72
4	22.50	310.39	179.38	23.76
5	24.25	310.63	176.34	24.67

Statistická hodnota	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Ag %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	22.83	310.50	173.97	22.62
Směrodatná odchylka	0.81	0.82	10.11	1.72



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv, užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 5.6.2009

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 5.6.2009

Signature